

***ÉTUDE DES MOUVEMENTS DE TERRAINS  
SUR LA COMMUNE DE TULLE***



**Coulée des Fages - juillet 2001  
(Photo La Montagne)**

**Rapport**

**MAI 2008**

## Résumé

Le territoire de Tulle a été affecté dans un passé récent par des épisodes pluvieux intenses. Tant en octobre 1960 qu'en juillet 2001, des glissements superficiels et des coulées de débris en dérivant ont révélé la sensibilité de la commune à ce type de phénomène en raison de l'environnement topographique (versants à forte pente) et de l'urbanisation. Une analyse historique des mouvements de terrains montrent l'existence d'un nombre relativement important de phénomènes, parmi lesquels les éboulements et chutes de blocs au niveau d'escarpements naturels ou artificiels (anciennes carrières) sont les plus manifestes.

L'étude des mouvements de terrains sur la commune de Tulle a porté en particulier sur l'analyse de l'aléa glissement superficiel – coulée de débris, sachant que ce type de phénomène présente la particularité de laisser peu d'indices morphologiques de surface de son activité passée. Ceci impose de développer une méthodologie d'analyse différente de celle habituellement développée pour l'étude des mouvements de terrains puisqu'il s'agit de déterminer les zones potentiellement sensibles. Les pluies étant le facteur de déclenchement des phénomènes, la détermination de l'aléa peut s'appuyer sur une quantification de la probabilité d'occurrence des phénomènes en fonction de la durée de retour des pluies critiques pour la stabilité des terrains.

Dans un contexte de forte urbanisation qui modifie considérablement les conditions hydrologiques des versants (surfaces imperméabilisées, voiries qui redistribuent en concentrant/réduisant les écoulements de surface...), la mise en œuvre d'un modèle informatique de détermination permet d'obtenir un zonage satisfaisant des sites sensibles aux glissements superficiels, malgré l'existence de cas –limites (site de la coulée des Fages de 2001). L'expertise de terrain permet ensuite d'évaluer les résultats de la cartographie automatique de l'aléa qui se révèle globalement satisfaisante.

Pour les autres phénomènes, l'aléa éboulements-chutes de blocs est bien connu localement ce qui ne signifie pas qu'il est parfaitement maîtrisé. Enfin, deux glissements de terrains profonds au sein du massif rocheux ont été repérés à Pra-Limouzy et à Louradour-Auzelou. A Pra-Limouzy, les déformations sur le bâti et sur la voirie indiquent que le glissement est sujet à des réactivations périodiques au moins dans sa partie supérieure.

Du point de vue de la gestion des risques, l'engagement d'un Plan de Prévention des Risques est justifié au regard de l'importance des événements historiques et de leurs conséquences. Parallèlement, des interventions 1) de protections active/passive sont ponctuellement nécessaires, 2) de surveillance des déformations sur le bâti (glissement de la Brousse à Pra-Limouzy) sont recommandées.

Pour la gestion des risques de glissements superficiels-coulées de débris, la mise au point d'un protocole d'alerte est nécessaire ainsi qu'une information précise et pédagogique des habitants des zones sensibles.

### Etude réalisée par :

- ↪ **Christian Lajournade**, Chef de Projet.
- ↪ **Guillaume Arlandes**.

## Sommaire de l'étude

<b>1. PREAMBULE : CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE .....</b>	<b>4</b>
<b>2. METHODOLOGIE GENERALE DE L'ETUDE .....</b>	<b>4</b>
<b>3. CARACTERISTIQUES DES GLISSEMENTS SUPERFICIELS ET DES COULEES DE DEBRIS.....</b>	<b>5</b>
<b>3.1 Les glissements superficiels et des coulées de débris dans la typologie des mouvements de terrains – terminologie .....</b>	<b>5</b>
3.1.1 Typologie .....	5
3.1.2 Terminologie.....	5
<b>3.2 Caractéristiques des glissements superficiels et des coulées de débris.....</b>	<b>6</b>
3.2.1 Le facteur hydrologique .....	8
3.2.1.1 Incidence des routes/pistes sur l'instabilité superficielle.....	10
3.2.1.2 Incidence des travaux forestiers.....	11
<b>4. CONTEXTE PHYSIQUE DE LA REGION DE TULLE .....</b>	<b>12</b>
<b>4.1 Hydrographie .....</b>	<b>12</b>
<b>4.2 Géologie.....</b>	<b>12</b>
<b>4.3 Topographie.....</b>	<b>13</b>
<b>4.4 Climatologie-pluviométrie.....</b>	<b>15</b>
4.4.1 Aperçu climatologique.....	15
4.4.2 Pluviométrie de forte intensité à l'échelle régionale.....	15
4.4.3 Analyse des phénomènes cachés d'épisodes pluvieux historiques de forte intensité	17
<b>5. ANALYSE DES MOUVEMENTS DE TERRAINS HISTORIQUES ET OBSERVES.....</b>	<b>19</b>
<b>5.1 Eboulements et chutes de blocs.....</b>	<b>20</b>
5.1.1 Données historiques .....	20
5.1.1.1 L'éboulement de 1873 .....	20
5.1.1.2 Eboulement du Puy St Clair de février 1966 .....	21
5.1.2 Données d'observation.....	22
<b>5.2 Les glissements dans le massif rocheux.....</b>	<b>24</b>
<b>5.3 Les glissements superficiels - coulées de débris.....</b>	<b>29</b>
5.3.1 L'épisode de 1960.....	29
5.3.1.1 Pra-Limouzy .....	30
5.3.1.2 Lauradou – L'Auzelou.....	31

5.3.2	L'épisode de janvier 1994.....	32
5.3.3	L'épisode de juillet 2001 .....	34
<b>6.</b>	<b>ANALYSE DES ALEAS.....</b>	<b>36</b>
<b>6.1</b>	<b>Aléa éboulements - chutes de blocs.....</b>	<b>36</b>
<b>6.2</b>	<b>Aléa glissements rocheux.....</b>	<b>36</b>
<b>6.3</b>	<b>Aléa de glissements superficiels – coulées de débris .....</b>	<b>37</b>
6.3.1	Présentation du modèle de Montgomery et Dietrich .....	37
6.3.2	Calage du modèle et détermination des valeurs de pluie critique de déclenchement des glissements superficiels .....	38
6.3.3	Résultats .....	39
6.3.3.1	Cohérence des résultats à l'échelle globale .....	39
6.3.3.2	Cohérence historique .....	41
6.3.3.2.1	Non-détection d'événements historiques .....	41
6.3.3.2.2	Attribution de durée de retour de pluies critiques trop longue .....	42
6.3.3.2.3	Attribution de durée de retour de pluies critiques trop courte .....	42
6.3.3.3	Analyse sectorielle sur les sites à faible durée de retour sans événement historique connu.....	42
6.3.3.4	Conclusion sur la validité de la modélisation .....	43
6.3.4	Classement de l'aléa et cartographie de l'aléa .....	44
6.3.4.1	Classement de l'aléa .....	44
6.3.4.2	Cartographie de l'aléa : contrôle de terrain.....	45
6.3.5	Définition et cartographie de l'aléa de coulée de débris sur les bâtiments .....	46
6.3.5.1	Définition de l'aléa de coulée de débris sur les bâtiments.....	46
6.3.5.2	Cartographie de l'aléa coulée de débris sur les bâtiments .....	48
6.3.5.3	Confrontation aux données de terrains .....	48
6.3.5.4	Conclusion sur la cartographie de l'aléa de coulée de débris .....	53
<b>7.</b>	<b>GESTION DES RISQUES.....</b>	<b>53</b>
<b>7.1</b>	<b>Volet réglementaire.....</b>	<b>53</b>
<b>7.2</b>	<b>Volet protection .....</b>	<b>53</b>
7.2.1	Mesures et travaux de protections.....	53
7.2.2	Les modalités d'alerte et de gestion de crise.....	54
<b>8.</b>	<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>56</b>
<b>9.</b>	<b>RÉFÉRENCES DOCUMENTAIRES .....</b>	<b>58</b>
<b>9.1</b>	<b>Publications scientifiques .....</b>	<b>58</b>
<b>9.2</b>	<b>Études techniques non publiées .....</b>	<b>60</b>
<b>10.</b>	<b>ANNEXE 1 : RECAPITULATIF DES PHENOMENES HISTORIQUES .....</b>	<b>61</b>

---

<b>11. ANNEXE 2 : METHODOLOGIE D'ETUDE DES GLISSEMENTS SUPERFICIELS ET DES COULEES DE DEBRIS.....</b>	<b>62</b>
<b>11.1 Détermination des seuils pluviométriques d'instabilité.....</b>	<b>62</b>
11.1.1 Relations pluie antécédente – pluie génératrice.....	62
11.1.2 Les relations empiriques pluie-instabilité.....	63
11.1.3 Les modèles numériques d'analyse de stabilité.....	65
11.1.3.1 Modèle hydrologique.....	66
11.1.3.2 Modèle mécanique.....	68
11.1.3.3 Seuil pluviométrique critique.....	68

## 1. Préambule : contexte et objectifs de l'étude

Les fortes pluies des 4 et 5 juillet 2001 centrées sur le département de la Corrèze ont provoqué de fortes inondations sur les régions de Tulle et de Brive et de nombreux mouvements de terrains à caractère superficiels. A Tulle, une coulée de débris boueuse initiée par un glissement superficiel provoquera la mort d'une fillette de 5 ans sur le site des Fages.

Ce drame a conduit les pouvoirs publics à s'interroger sur l'importance des risques de mouvements de terrain sur la commune de Tulle et à engager une étude de diagnostic sur les risques liés aux éboulements-chutes de blocs, aux glissements (superficiels et profonds) et aux coulées de débris initiés par glissement des formations superficielles.

Dans ce cadre, il était nécessaire de porter une attention particulière aux glissements superficiels et aux coulées de débris associées. Géodes Géologues-Conseils ayant réalisé en 2002-2003 une étude spécifique sur ces phénomènes dans le département du Tarn<sup>1</sup>, il était prévu initialement (2004, date de l'appel d'offre) de reprendre la méthodologie développée en 2002-2003 pour l'étude des risques de glissement-coulée de débris dans le Tarn. Entre temps, nous avons modifié cette approche initiale en généralisant l'analyse des conditions de la stabilité des terrains superficiels par **modélisation numérique** couplée à l'utilisation d'un SIG.

## 2. Méthodologie générale de l'étude

Pour l'étude des autres types de mouvements de terrains pris en compte dans l'étude (éboulements-chutes de blocs et glissements rocheux) l'approche générale est classique pour ce type d'étude de diagnostic et cartographie :

- ⇒ Recensement des événements historiques (BD mouvements de terrains du BRGM ; données historiques de la DDE 19 – Bureau de l'Environnement et des Risques).
- ⇒ Analyse géologique (carte géologique de Tulle au 1/50 000).
- ⇒ Télédétection sur images aériennes.
- ⇒ Analyses de terrain.
- ⇒ Cartographie à l'échelle du 1/5000 sur fond cadastral.

---

<sup>1</sup> « Analyse des risques de glissement-coulée sur le département du Tarn » ; Géodes-Géologues Conseils ; PREFECTURE DU TARN - Direction Départementale de l'Équipement, 2003

### 3. Caractéristiques des glissements superficiels et des coulées de débris

#### 3.1 Les glissements superficiels et des coulées de débris dans la typologie des mouvements de terrains – terminologie

##### 3.1.1 Typologie

Les mouvements de terrains peuvent être séparés en deux groupes principaux en fonction du matériau déplacé et à la suite de la profondeur de l'instabilité :

1. Les mouvements affectant les formations superficielles, généralement meubles et faiblement consolidées. Ces mouvements sont dénommés « **mouvements superficiels** » (« shallow movements ») terme qui traduit une de leur caractéristique, la faible profondeur, déterminée par l'épaisseur – d'ordre métrique à décimétrique - des formations superficielles.<sup>2</sup>
2. Les mouvements affectant le massif rocheux, généralement consolidé. On parlera à la suite de « **mouvements rocheux** » ou de « **mouvements profonds** » (« deep-seated movements ») termes adaptés pour désigner les mouvements de grande ampleur qui impliquent des tranches de terrains d'épaisseur décimétrique à hectométrique.

Les **phénomènes étudiés ici** entrent dans la catégorie des **mouvement superficiels**.

La vitesse de déplacement des phénomènes constitue un second critère de différenciation typologique. On distingue ainsi :

- Les mouvements lents : solifluction, glissement profond (en centimètre/an ou mètre/an) ;
- Les mouvements intermédiaires : glissement (en mètre/mois) ;
- Les mouvements rapides : coulée superficielle sur « faible pente » (en m/h) ;
- Les mouvements instantanés : éboulement-écroulement ; avalanche rocheuse ; coulée superficielle sur « forte pente » (en km/h).

##### 3.1.2 Terminologie

Les **phénomènes étudiés ici** correspondent à l'**écoulement d'une masse généralement boueuse initiée par glissement**. Le terme de **glissement-coulée** semblerait donc approprié mais il est parfois utilisé en France pour désigner des mouvements de terrain superficiel chronique et à faible vitesse de déplacement combinant glissement et écoulement.

Dans la littérature francophone, le terme de coulée boueuse semble également adéquat, mais on constate également son usage pour désigner le type de phénomène précédent. En

---

<sup>2</sup> Dans certains contextes sédimentaires particuliers (environnement glacio-lacustre par exemple), les épaisseurs de dépôts peuvent être pluridécimétriques et le caractère superficiel des mouvements de terrains devient alors moins pertinent.

conséquence, il convient de trouver un consensus permettant d'éviter les confusions de phénomènes.

On propose donc ici d'utiliser le terme de **coulée de débris** ou dans certains cas **d'avalanche de débris**, ce dernier soulignant bien le caractère très rapide de ces phénomènes sur des versants à forte pente. Il permet en outre de lever toute confusion avec les termes courants francophones. Ces termes sont les traductions littérales des termes anglophones « debris-flow et debris-avalanche » de Varnes (1978) en recouvrant le même sens. La littérature anglophone retient généralement le terme de « debris-flow » soit coulée de débris.

En fonction de l'environnement topo-morphologique, on distinguera :

- Les **coulées de débris sur versant** sans confinement latéral ;
- Les coulées canalisées par un talweg : on entre ici dans le domaine torrentiel. On parlera ici de **coulées de débris torrentielles ou de laves torrentielles**.

Du fait de leur évidente similitude, les coulées-avalanches de versants et les coulées de débris torrentielles ne peuvent cependant pas être disjointes.

### **3.2 Caractéristiques des glissements superficiels et des coulées de débris**

Il s'agit de **mouvements de terrains dans les formations superficielles** présentant un faciès d'agglomérat souvent hétérométrique, c'est à dire un mélange meuble d'éléments grossiers (petits galets à gros blocs) et d'éléments fins constituant la matrice, incorporant ou non une fraction argileuse en proportion variable.

La profondeur des mouvements est évidemment fonction de l'épaisseur des formations superficielles. Cependant, lors de pluies intenses, la **saturation des terrains s'effectue depuis la surface** déterminant une limite de rupture au sein des formations superficielles. Il est ainsi rare d'observer des mouvements à l'interface du substratum rocheux (auquel cas, la saturation des terrains est liée à des **pluies antécédentes** importantes, voir ci-dessous, ou à des surpressions à l'interface rocher-sol). Ainsi, les profondeurs au niveau de la zone de glissement initiale sont d'ordre métrique à plurimétrique, les valeurs que nous avons pu mesurés dépassant rarement 3-4 mètres.

Les clichés n°2 et 3 montrent deux exemples de zones de glissement initial qui encadrent bien l'intervalle des profondeurs de ces mouvements : de l'ordre de 1 m dans le premier cas ; près de 4 m dans le second cas.

On observe par ailleurs, les caractéristiques présentées par Soutadé (1978) pour décrire les xalades<sup>3</sup> en particulier le fond plat qui est lié à la dynamique initiale de glissement de type plan.

---

<sup>3</sup> Xalade (prononcer chalade) signifie griffure en catalan et désigne les glissements et coulées de débris associés qui constituent l'un des processus majeurs d'érosion des versants lors des épisodes pluvieux très de forte intensité.

Les glissements-coulées de débris sont fréquents en milieu forestier. Le rôle protecteur de la forêt est fonction de l'âge et de la nature du boisement, facteurs déterminant les valeurs de la cohésion racinaire. Le cliché n°1 montre en particulier un glissement-coulée de débris (ici le terme d'avalanche de débris prend tout son sens) qui a fauché près de 6000 m<sup>2</sup> de hêtraie projetés massivement dans le torrent en pied de versant. On mesure ici l'impact potentiellement désastreux de ce genre de phénomène sur la dynamique d'un cours d'eau du fait de la formation d'embâcles considérables.

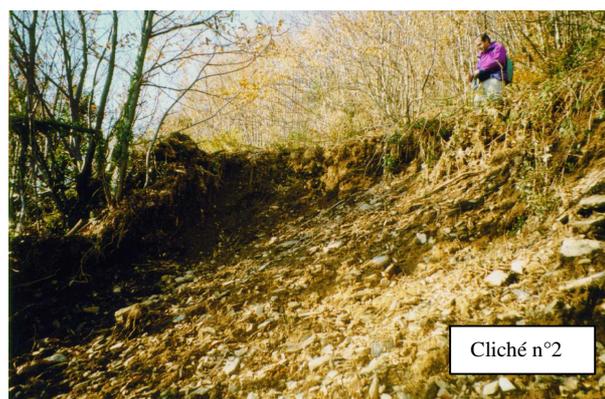


Figure n°1 : caractéristiques des glissements superficiels et des coulées de débris associées

Le risques de glissements-coulées de débris sont nettement accentués, y compris en zone forestière, par **la modification des conditions de drainage du versant** : les routes et chemins constituent des perturbations hydrologiques majeures du fait en particulier de l'existence de rejets concentrant le ruissellement (cf.ci-dessous). Les clichés n°1 et 2 montrent deux exemples de coulées de débris sous forêt qui sont reliés à des voies de circulation (route départementale dans le premier cas ; ancienne piste d'exploitation forestière dans le second cas, la personne se situant sur le chemin en contre-haut ).

Le déclenchement de glissement-coulée de débris, sous forêt ou hors forêt, peut bien sûr être « non-anthropique ». Les clichés n°3 et 4 (figure n°1) montrent un mouvement initié par l'émergence d'un écoulement sur la zone de glissement. L'analyse topographique du versant montre ici l'existence d'un talweg peu marqué, car colmaté par les formations superficielles, qui a naturellement servi d'axe de drainage. Les talwegs, en tant que forme de convergence des écoulements et d'accumulation sédimentaire, constituent des zones très sensibles aux glissements superficiels et au coulées de débris associées.

D'un point de vue de la protection des biens et des personnes, les glissements-coulées de débris constituent un phénomène très redoutable car il est **extrêmement rapide** et son énergie cinétique lui procure un potentiel d'endommagement important sur des bâtiments situés en pied de versant. Les arbres transportés par les coulées peuvent constituer des « béliers » redoutables pouvant provoquer les dommages les plus importants sur la structure d'un bâtiment (clichés 5 et 6).

### 3.2.1 Le facteur hydrologique

Les mouvements de terrains étudiés sont donc localisés dans les formations superficielles (sol). Le glissement résulte de **la saturation hydrique des terrains** conduisant à un accroissement de la **pression hydrostatique** et le **dépassement de la résistance au cisaillement du matériau**.

La figure n°2 illustre les différents éléments déterminant ou perturbant l'hydrologie de sub-surface et leur incidence sur le déclenchement de glissements superficiels dans le sol pouvant évoluer en coulée de débris. On a figuré en particulier :

1. les zones de convergence (talweg) des écoulements favorisant l'émergence de source ;
2. l'écoulement dans les formations superficielles (sol) ;
3. les écoulements au sein des discontinuités du massif rocheux et **3'** les surpressions à l'interface substratum – sol.
4. les perturbations induites par la voirie favorisant des rejets après concentration.

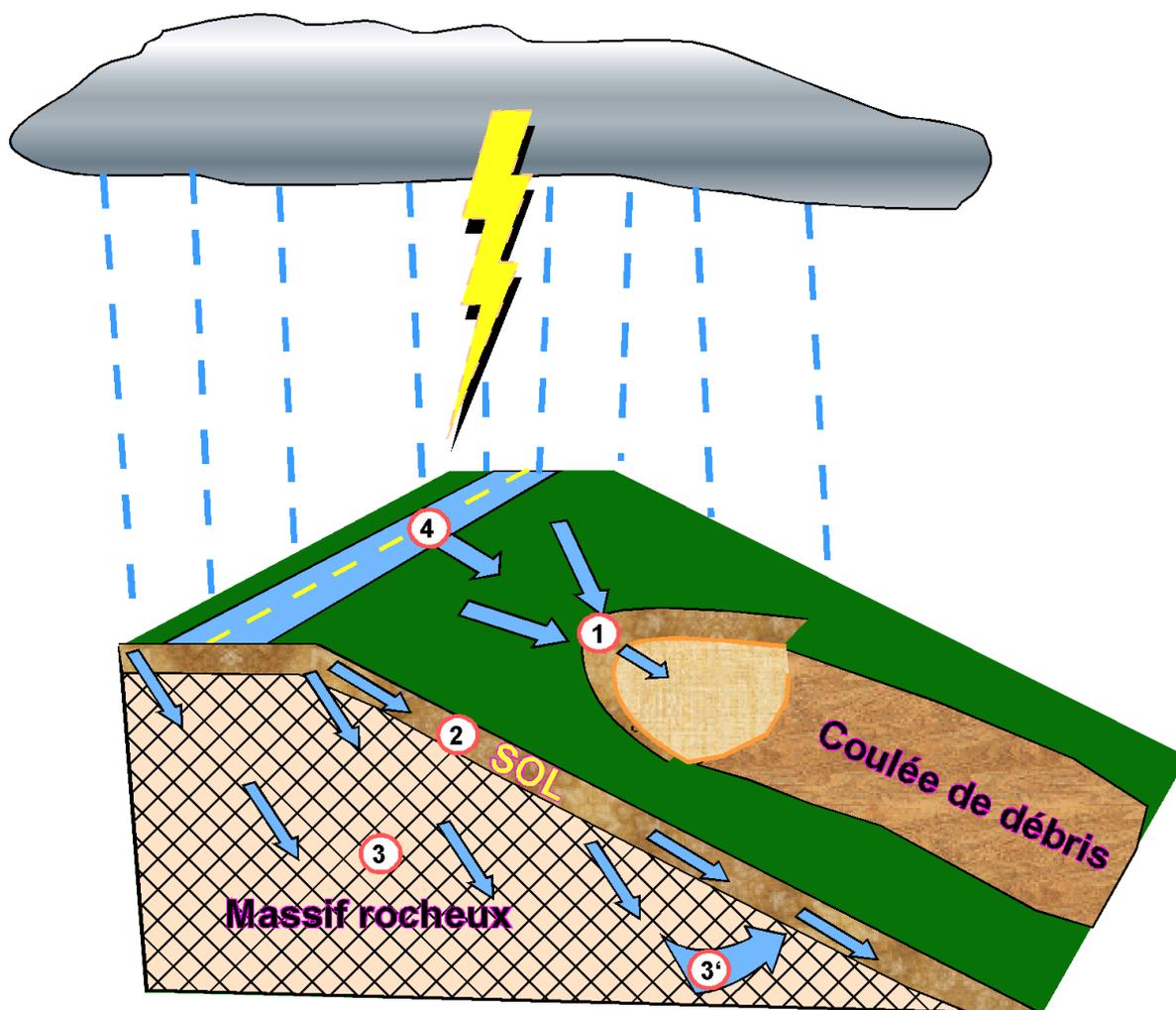


Figure n°2 : Schéma synthétique de l'hydrologie d'un versant

Les caractéristiques principales des phénomènes sont résumées à la suite :

1. Les glissements superficiels et les coulées de débris associées concernent généralement des versants à forte pente. Une limite empirique de l'ordre de 25°- 30° peut être admise à partir de laquelle la probabilité de coulée-avalanche devient très forte. Les glissements superficiels peuvent se produire sur des pentes plus faibles, mais la probabilité d'évolution en coulée-avalanche diminue. Cette limite empirique de 25°- 30° reste à valider/préciser par une étude théorique, mais le problème est extrêmement complexe et on ne dispose pas actuellement de formulations théoriques permettant de déterminer un seuil de déclenchement d'une coulée de débris après glissement (cf. Iverson R.M., Reid M.E., LaHusen R.G., 1997 pour une revue théorique du problème).
2. Les phénomènes sont préférentiellement associés à des pluies de fortes intensités sur de faibles durées (> 150-200 mm / 24 h). En l'état des connaissances, il n'est pas possible de déterminer un seuil pluviométrique d'apparition des phénomènes compte-tenu de l'inconnu du degré de saturation des terrains avant un

événement pluviométrique déclencheur. Ce point sera repris ultérieurement pour l'analyse des aléas.

3. Les volumes déplacés sont généralement de l'ordre de quelques centaines à quelques milliers de m<sup>3</sup> : il s'agit donc de mouvements de faible à moyenne ampleur.
4. Cependant, des mouvements en grande masse (> 0,1 - 1 M m<sup>3</sup>) sont possibles dans des contextes topographiques, géologiques et pluviométriques particuliers. Le glissement de la Baillanouse (66) en est le prototype. Survenu lors des intempéries exceptionnelles d'octobre 1940 (≈ 2000 mm en 5 jours dont ≈ 1000 mm le 17 octobre !) le glissement de la Baillanouse se produit le 18 octobre, mobilisant 3 à 4 M m<sup>3</sup> comblant le fond de vallée sur une cinquantaine de mètres de hauteur provoquant en amont un exhaussement du lit de plus de 20 m du fait des apports solides de la crue ! A proximité de Tulle (50 km au sud), **la coulée de Mézels (Vayrac, 46)** survenue le 3 octobre 1960 a mobilisé un volume de l'ordre de 50 000 à 100 000 m<sup>3</sup> qui s'est déposé dans le lit de la Dordogne. Des travaux d'urgence très importants de curage du lit ont été nécessaires afin de contenir la divagation de la rivière sur la rive opposée.
5. La présence d'un talweg constitue un facteur de forte prédisposition : épaisseur de formations superficielles plus importantes et concentration du drainage du versant (Dunne, 1991 ; Montgomery *et al.*, 1998).
6. La présence d'une route / piste et les rejets pluviaux associés constituent sans aucun doute des facteurs aggravants. En zone urbaine, à l'exemple de Tulle, l'analyse des phénomènes est donc fortement perturbée par rapport à l'environnement naturel.
7. La présence d'une couverture boisée n'empêche pas le déclenchement des phénomènes. Elle constitue, par ailleurs, un facteur aggravant dans le cas de crues torrentielles associées aux mouvements de versants. Les versants ayant fait l'objet d'une coupe forestière récente sont par ailleurs plus sensible.

Le rôle de ces deux derniers facteurs nécessite d'être précisé. Les auteurs s'accordent généralement pour leur reconnaître une incidence péjorative (Frederiksen, 1970 ; Brown et Krygier, 1971 ; Mersereau et Dyrness, 1972 ; Swanson et Dyrness, 1975 ; Swanston et Dyrness, 1976 ; Greswell *et al.*, 1979).

### 3.2.1.1 Incidence des routes/pistes sur l'instabilité superficielle

Lors d'événements pluvieux intenses/durables, le réseau routier et les pistes constituent toujours des zones privilégiées pour les mouvements de terrains, qu'ils soient d'ailleurs superficiels ou profonds. Montgomery *et al.* (1998) mettent ainsi en évidence que 58 % des 3224 mouvements superficiels recensés sur un territoire de près de 3000 km<sup>2</sup> sont localisés sur le réseau routier (« road-related landslides »).

Les opérations de talutage, de remblai-déblai, d'une part, **la perturbation du drainage**, d'autre part peuvent accroître l'instabilité intrinsèque d'un versant. Comme le souligne Montgomery *et al.* (1998), les **glissements routiers** correspondent toujours à un **contexte naturellement sensible**, une route ou une piste servant de révélateur ou de catalyseur à

l'apparition de mouvements. En d'autres termes, **une route tend à abaisser le seuil de déclenchement d'une instabilité naturelle pré-existante.**

En ce qui concerne **la perturbation du drainage**, elle peut être :

- ⇒ soit **défavorable** pour les conditions normales de stabilité en accroissant en un point donné l'aire de drainage topographique : le cas typique est celui des points bas de segment de routes descendantes et convergentes.

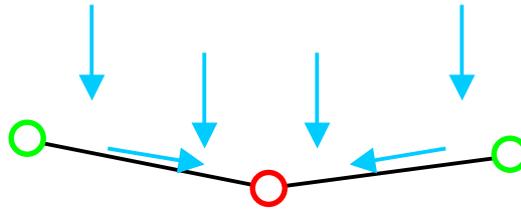


Figure n°3 : Schéma en coupe de la répartition des écoulements sur une route à sections convergentes

- ⇒ soit **favorable** à la stabilité, vers l'extérieur des segments, le drainage sur route des écoulements du haut de versant tend à réduire les apports d'eau et accroît donc le seuil normal de saturation, c'est à dire la valeur de la pluie critique.

**En zone urbaine**, l'incidence de la voirie constitue évidemment un facteur de perturbation majeur dont la prise en compte est de plus complexifiée dans le cas de l'existence d'un **réseau pluvial**. Pour une modélisation de ces facteurs, il conviendrait d'établir un modèle hydrologique/hydraulique intégrant la topographie de la voirie (pente en long, profil en travers) et la capacité du réseau.

Borga M. et *al* (2005) ont tenté de modéliser l'incidence des pistes forestières sur la répartition des glissements mais la non-intégration des données topographiques de la piste et l'absence d'un modèle hydraulique sur le même réseau expliquent sans doute l'échec de leur tentative.

### 3.2.1.2 Incidence des travaux forestiers

Bien que contesté par certains auteurs (Skaugest *et al.*, 1993 ; Martin *et al.*, 1996 ; par exemple), le rôle défavorable des coupes forestières est peu douteux (Montgomery *et al.*, 2000 pour une synthèse). Les travaux forestiers induisent trois types de perturbations pouvant combiner leurs effets : 1. l'incidence propre à la création de pistes pour l'exploitation (voir ci-dessus) ; 2. la modification de l'hydrologie du versant induite par la suppression du couvert végétal ; 3. l'impact sur le système racinaire et la perte de cohésion qu'il détermine.

En effet, la coupe d'un arbre modifie quasi-instantanément le pouvoir cohésif du système racinaire sur les terrains. Le pouvoir cohésif du système racinaire est principalement assuré par les radicelles qui meurent très rapidement après une coupe (Burroughs et Thomas, 1977 ; Ziemer et Swanston, 1977). Sur une durée de 3 à 15 jours suivant une coupe, la cohésion (C') d'un sol portant un sapin Douglas chute d'environ 17 kN/m<sup>2</sup> à environ 2

kN/m<sup>2</sup>. La valeur initiale ne sera atteinte qu'à la maturité de la nouvelle pousse, soit au bout de plusieurs décennies (Burroughs et Thomas, 1977 ; Slide, 1992).

Montgomery et *al.* (1998) montrent que les conditions de déclenchement des mouvements superficiels sont extrêmement sensibles à la valeur de la cohésion et donc au rôle cohésif du système racinaire. Les glissements recensés par ces auteurs correspondent effectivement à des zones instables pour des valeurs de C' de 2 kN/m<sup>2</sup> ; pour des valeurs de C' comprises entre 8 et 16 kN/m<sup>2</sup>, les simulations de stabilité indiquent que la quasi-totalité des sites à glissements effectifs serait théoriquement stables !

## 4. Contexte physique de la région de Tulle

### 4.1 Hydrographie

La ville de Tulle est établie dans la vallée de la Corrèze qui reçoit à son niveau plusieurs affluents : la Solane et la Céronne en rive droite, et en rive gauche les apports conjugués de la Gimelle et de la St Bonnette qui collecte elle-même la Ganette et la Donnette.

### 4.2 Géologie

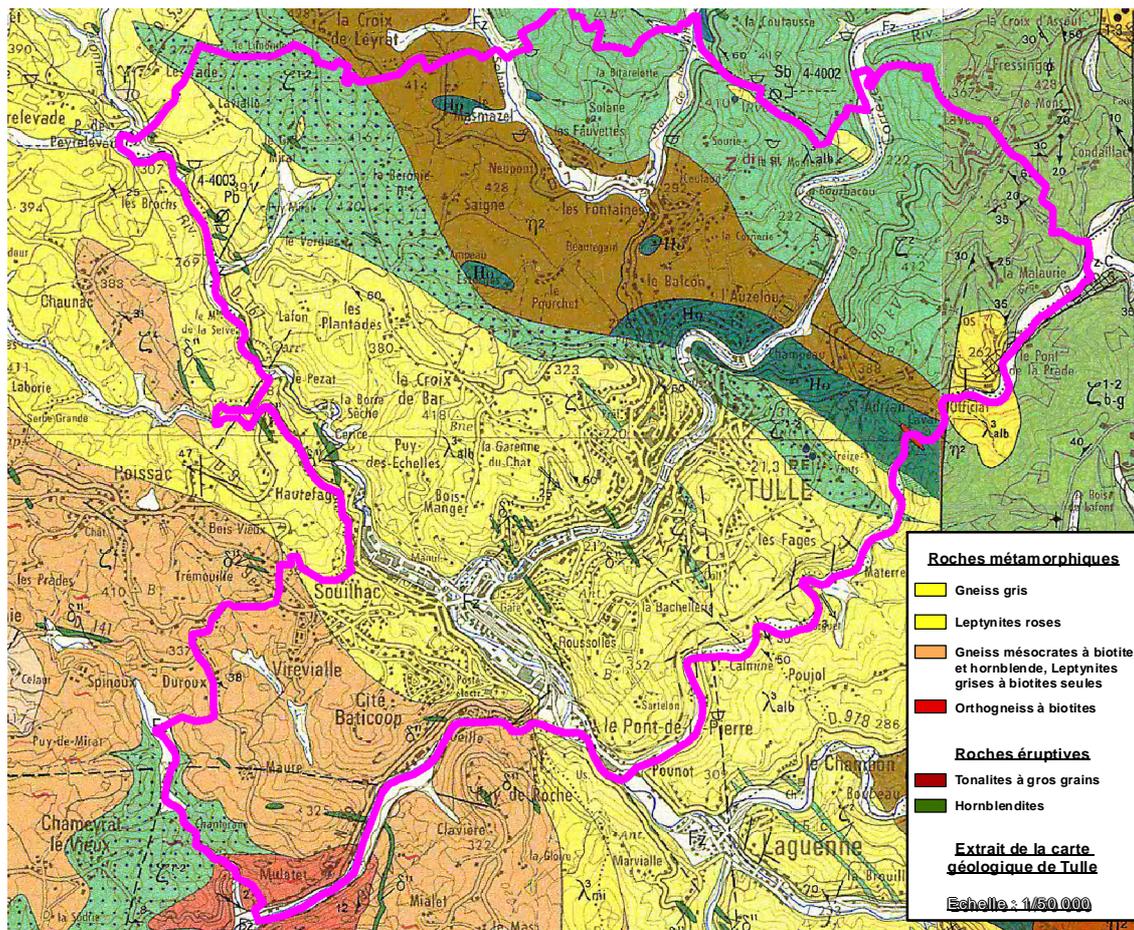


Figure n°5 : Carte géologique de la région de Tulle (extrait de la carte géologique au 1/50 000 du BRGM)

Le territoire de Tulle correspond essentiellement à des formations métamorphiques (série du Bas-Limousin) : orthogneiss, gneiss et leptynites, ces dernières constituant la formation la plus étendue. La phase de métamorphisme est datée entre 380-400 M.A. et 350 M.A. Une importante phase de magmatisme tardi- à post-métamorphe se manifeste à partir du Dévonien supérieur mettant en place en particulier les tonalites et les hornblendites présentes au N-N.E. de la commune.

### **4.3 Topographie**

Les fonds de vallée étant relativement étroits (200 à 250 m environ dans le centre de Tulle) et contraints par les inondations, la ville a colonisé les versants qui présentent souvent des pentes fortes. L'analyse des pentes (figure n°6) montre que :

- ⇒ 30 % du territoire communal présentent des pentes comprises entre 10 et 15°;
- ⇒ 15 % du territoire communal présentent des pentes comprises entre 15 et 20° de pente ;
- ⇒ 8 % du territoire communal présentent des pentes comprises entre 20 et 25 ;
- ⇒ 2 % du territoire communal présentent des pentes comprises entre 25 et 30 ;
- ⇒ 0,3 % du territoire communal présentent des pentes comprises supérieures à 30 ;

Cette analyse montre bien l'importance de la contrainte topographique sur le territoire communal.

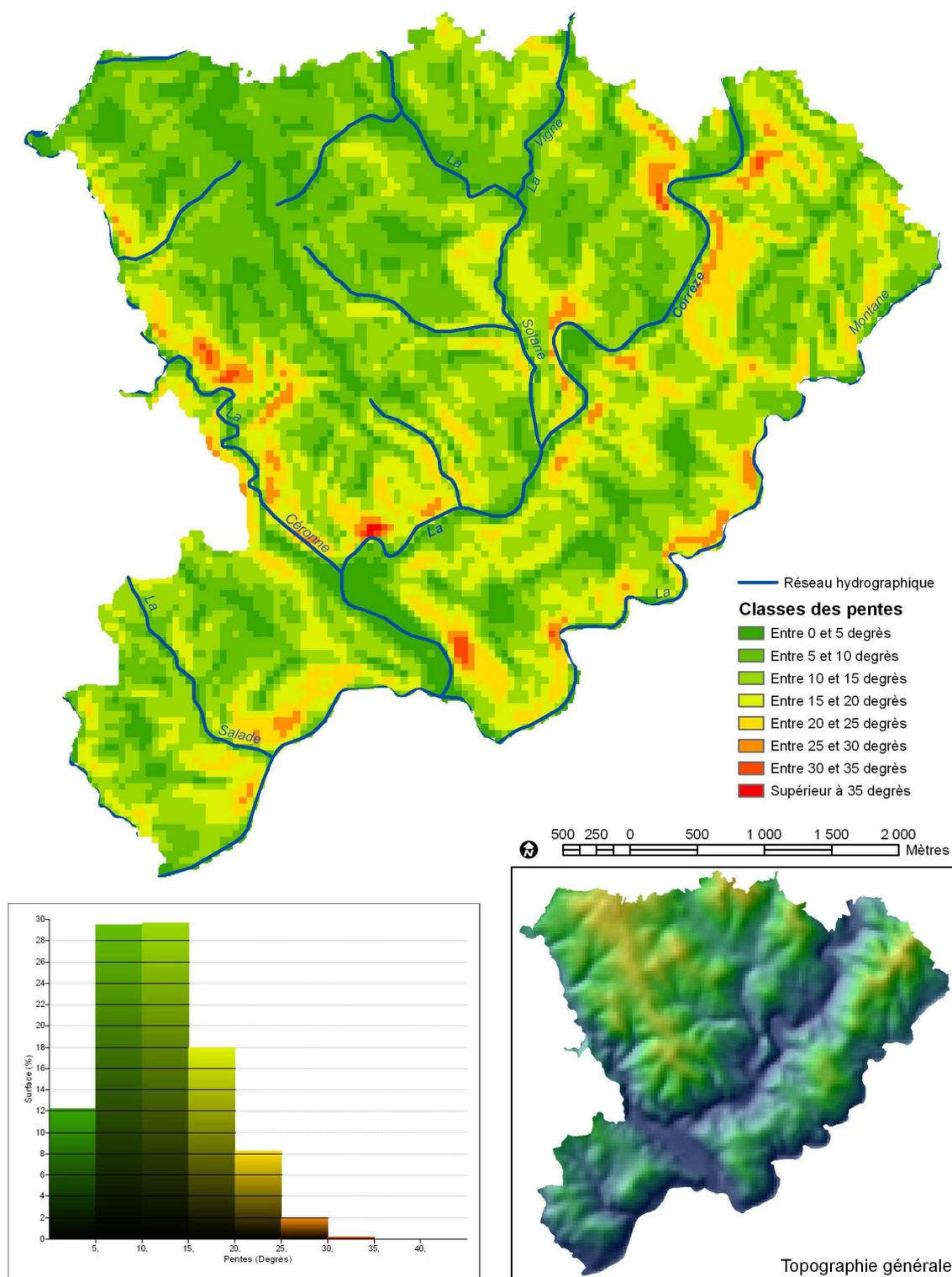


Figure n°6 : Analyse des pentes sur le territoire de Tulle

## 4.4 Climatologie-pluviométrie

### 4.4.1 Aperçu climatologique

Au sud du département de la Corrèze, Tulle se situe sur les premiers contreforts du Massif central. Sa situation valléenne et intra-montagnarde, détermine des hivers plus rigoureux que sa voisine Brive la Gaillarde. Climat de type océanique altéré : Le climat y est plus continental que sur le bassin de Brive avec des températures plus basses et des précipitations plus importantes. En période de beau temps hivernal, l'inversion thermique favorise la formation de brouillards givrants. Globalement, le climat est de type océanique altérée.

### 4.4.2 Pluviométrie de forte intensité à l'échelle régionale

La pluviométrie locale et régionale est abordée du point de vue des épisodes pluvieux de fortes intensité qui sont générateurs des glissements superficiels et des coulées de débris. Elle est marquée par l'existence de plusieurs événements remarquables. Avant d'en faire l'analyse, les données statistiques de Météo-France permettent un cadrage régional du potentiel pluvieux en terme d'intensité/durée/fréquence.

La figure n°7 montre que sur la période 1958-2000, le département de la Corrèze a connu plusieurs épisodes pluvieux supérieurs ou égaux à 100 mm/24 h. La fréquence de ces épisodes sur un poste pluviométrique est de l'ordre de 10 ans, cette valeur pouvant être retenue comme référence : il se produit au moins une fois par décennie, une pluie  $\geq 100$  mm/24 h.

La figure n°8 fait état sur la même période des pluies pluie  $\geq 200$  mm/24 h. On observe que ce seuil d'intensité/durée est observé une seule fois sur le département avec une fréquence d'apparition supérieure à 25 ans.

On obtient donc un premier cadrage : **les phénomènes pluvieux supérieurs à 200 mm/24 ont une fréquence d'apparition au moins supérieure à 25 ans à l'échelle régionale.**

**Le calcul de la valeur de la pluie par 24 h de fréquence centennale** montre que le sud du département de la Corrèze se situe dans la tranche **100-120 mm** (figure n°9).

Cependant, ces observations sont basées sur un protocole de relevés à heure fixe (6h-6h TU) qui conduit parfois à réduire fortement la valeur d'un épisode pluvieux dont la durée effective est proche de 24 h mais qui se situe sur 2 journées « météorologiques ». C'est ce que l'on appelle **les phénomènes « cachés »**. La prise en compte de ces phénomènes cachés peut sensiblement modifier les ajustements statistiques en restituant des valeurs maximales beaucoup plus fortes comme on l'observe pour les données pluviométriques de Tulle.

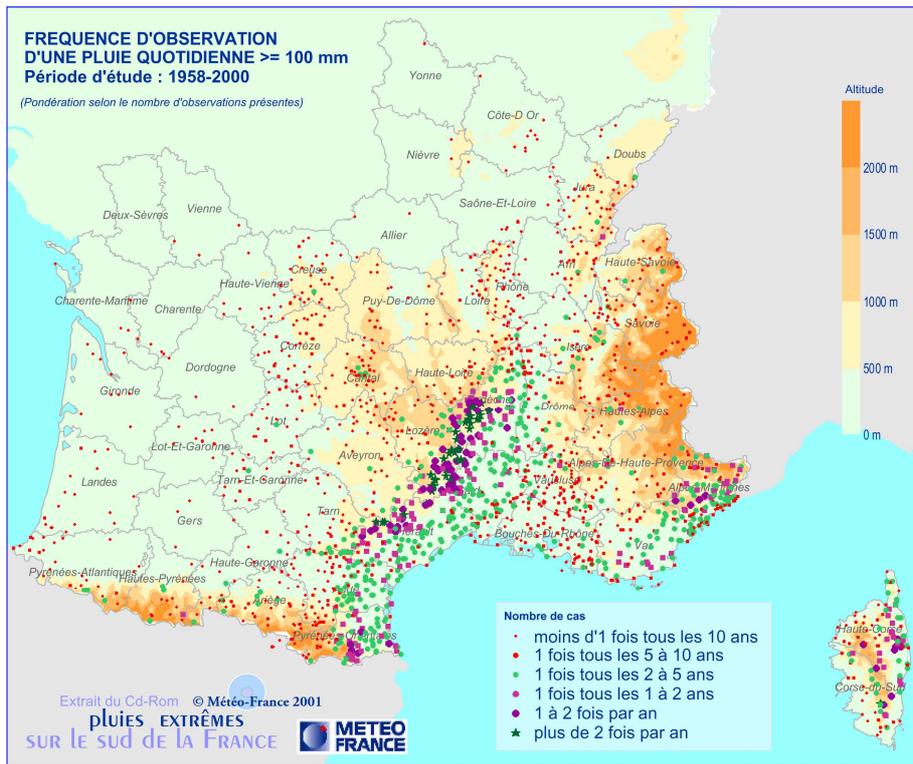


Figure n°7 : Fréquence d'observation d'une pluie de 24 h  $\geq 100$  mm

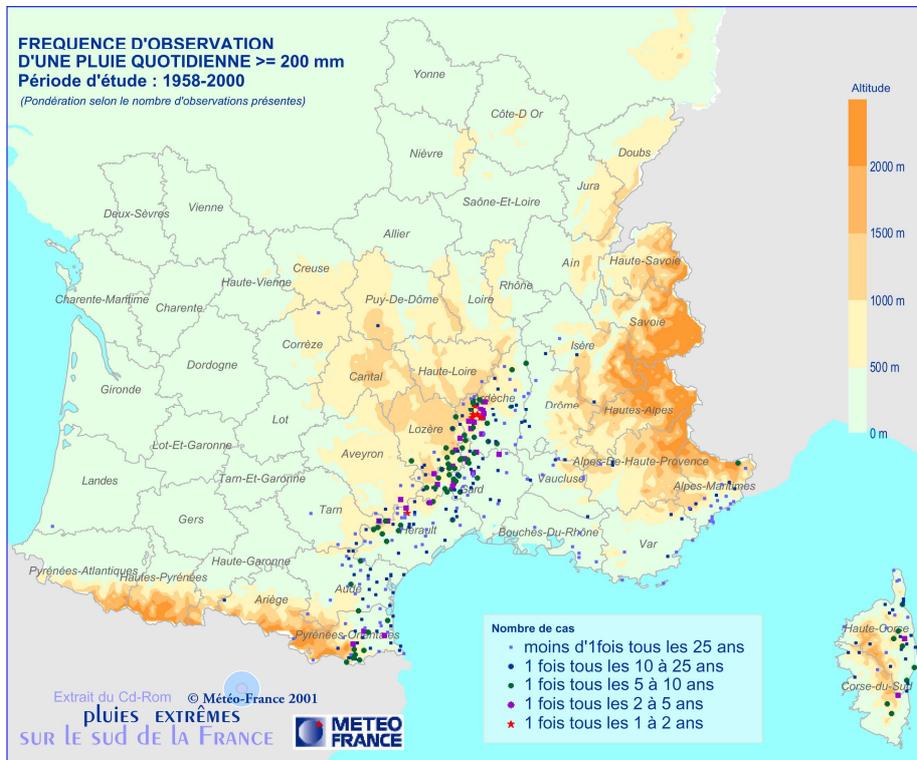


Figure n°8 : Fréquence d'observation d'une pluie de 24 h  $\geq 200$  mm

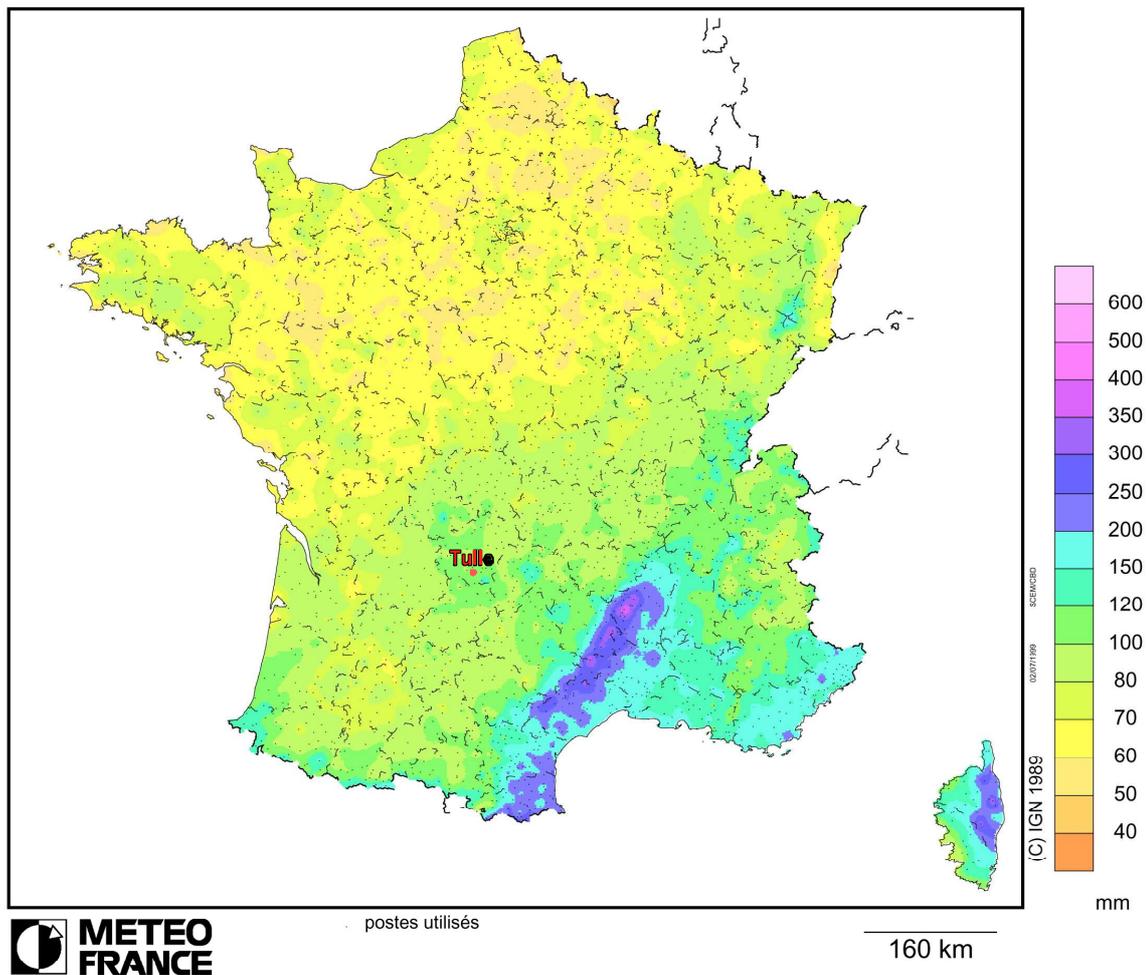


Figure n°9 : Valeurs de la pluie de 24 h de durée de retour 100 ans

#### 4.4.3 Analyse des phénomènes cachés d'épisodes pluvieux historiques de forte intensité

Sur la station pluviométrique de Tulle, on peut disposer d'une longue série de maxima annuels entre 1926 et 2006 totalisant 108 valeurs. On a traité statistiquement les valeurs de pluies sur 24 h d'une part et les pluies sur 48 h afin de prendre en compte les phénomènes cachés. Par exemple, la plus forte valeur de la série concerne la pluie de juillet 2001 : au pas de 24 h (entre 6h et 6h TU le lendemain), la pluie est de 138,2 mm ; au pas de 48 h, elle atteint 215,6 mm. En considérant le cumul maximum sur 24 h réel, on obtient une valeur de 184,4 mm (figure n°10).

On voit donc sur cet exemple le biais potentiellement très important que suppose la prise en compte de valeurs sur des relevés à heures fixes qui conduisent à réduire fortement la valeur réelle des pluies. Cette observation s'applique à un degré moindre à la pluie d'octobre 1960, seconde valeur la plus forte de la série de Tulle : 124,5 mm pour 24 h et 146 mm pour 48 h.

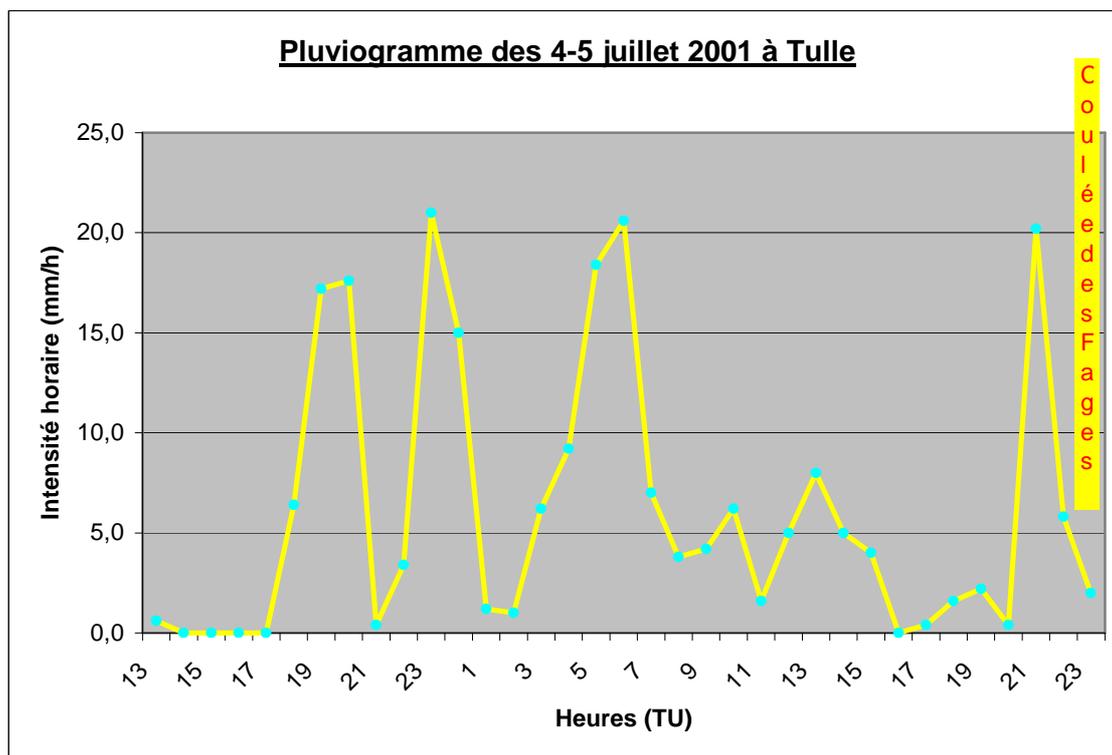


Figure n°10 : pluviogramme de la pluie des 4-5 juillet 2001 à Tulle

*N.B. : La pluie record des 1-2 août 1963 dans la région de Voutezac-Allasac-Objat constitue potentiellement un autre exemple de phénomène caché. On a enregistré 190 mm le 1<sup>er</sup> août et 80 mm le 2. Les journaux de l'époque font état de pluies orageuses à partir de 16h30 et durant la nuit du 1 au 2 août (170 mm d'eau dans la nuit au Saillant). Un cumul de 116 mm en 2h45 est enregistré à Objat. Il est donc possible que la durée de la pluie soit proche de 24 h, ce qui lui confère sans doute un caractère exceptionnel et extrême permettant de situer la valeur d'un phénomène plafond sur la région. Les dégâts par inondation et mouvements de terrains furent très importants, notamment à Allasac.*

Dans le cadre de cette étude, on a donc choisi pour déterminer les durées de retour des pluies critiques de prendre en compte les données de pluies sur 48 h plutôt que sur 24 h pour mieux intégrer les phénomènes cachés tels que celui de juillet 2001 ou d'octobre 1960.

Ce choix a pour conséquence d'attribuer des durées de retour plus courtes aux pluies critiques (figure n°11). Par exemple, une pluie critique de 150 mm aura une durée de retour proche de 100 ans sur l'ajustement des pluies de 48 h et une durée de retour proche de 500 ans sur l'ajustement des pluies de 24 h. Ce choix va dans le sens de la sécurité compte-tenu de l'incertitude de l'estimation des durées de retour pour des événements de fréquence rare à exceptionnelle (>100 ans à 10 000 ans).

Durée de retour (année)	Fréquence de non-dépassement	Valeur 48 h	Valeur 24 h
10000	0,9999	453	192
2000	0,9995	302	167
1000	0,999	255	156
500	0,998	216	148
200	0,995	173	130
100	0,99	147	120
50	0,98	126	109
20	0,95	103	93,9
10	0,9	88,2	82,6
5	0,8	75,8	70,8
3	0,6667	67,6	61,5
2	0,5	61,3	53
1,4286	0,3	55,6	44,4
1,25	0,2	52,9	39,8
1,1111	0,1	49,9	34,2
1,0526	0,05	47,9	30
1,0204	0,02	45,9	25,8
1,0101	0,01	44,8	23,3
1,005	0,005	43,9	21,1
1,001	0,001	42,2	16,9
1,0005	0,0005	41,7	15,4
1,0001	0,0001	40,6	12,4

Figure n°11 : Résultats des ajustements sur une loi GEV pour les maxima annuels de pluies en 24h et 48h à Tulle

## **5. Analyse des mouvements de terrains historiques et observés**

Les données historiques issues de la Base de données événements du B.R.G.M., celles collectées par le bureau de l'Environnement et des Risques de la Direction Départementale de l'Équipement, les informations réunies au cours de l'étude ainsi que les mouvements de terrains observés sont restitués dans la cartographie des phénomènes annexée.

Ces résultats sont présentés par type de phénomènes : éboulement et chutes de blocs ; glissements dans le massif rocheux ; glissements superficiels et coulées de débris.

Ils font l'objet des **cartes n°1 et 2 des phénomènes naturels au 1/5000** présentées hors texte auxquelles le lecteur se référera.

## 5.1 Éboulements et chutes de blocs

Les phénomènes d'éboulements et chutes de blocs sont les plus manifestes et donc les plus connus à Tulle. Généralement, les sites affectés correspondent à d'anciennes carrières (site de l'ancien Hôtel des Roches) ou à des talutages de versant en bordure de routes. Cependant, des versants non-aménagés sont prédisposés à ces phénomènes et des interventions humaines inappropriées peuvent générer des éboulements lourds de conséquences comme ce fut le cas en 1873.

*N.B. : Cet événement et le suivant (février 1966) se sont produits, comme on va le voir, par rupture au niveau du plan de foliation incliné à 50-60°. Ces mouvements ont un caractère mixte entre le glissement et l'éboulement, celui-ci étant relié normalement à des versants sub-verticaux imposant une chute libre au moins partielle et des rebonds sur le versant avant arrêt.*

### 5.1.1 Données historiques

#### 5.1.1.1 L'éboulement de 1873

Les recherches historiques menées par le bureau de l'Environnement et des Risques de la Direction Départementale de l'Équipement aux Archives Départementales ont permis de mettre à jour un événement survenu le 29 mars 1873 à 23 h. Une auberge, dénommée la Maison Verte, construite en pied de versant sur l'actuel quai Continsouza en face de l'ancien pont d'accès de l'usine de la Marque a été détruite par un éboulement important qui a pris naissance en haut de versant sous la route de Limoges. On relèvera dans les décombres 5 morts et 7 blessés.

Cette auberge avait été construite 7 ou 8 mois auparavant après décaissement du bas de versant. Dans les semaines précédentes, le creusement d'une cave à l'arrière du bâtiment à l'aide d'explosifs a sans doute contribué à fragiliser jusqu'à la rupture le haut du versant.

D'un point de vue géologique, le versant recoupe les leptynites et gneiss fortement fracturés. Mais c'est **la conformité entre le plan du versant** (N. 140-150°/40-50°E) et **le plan de foliation**<sup>4</sup> (N.140°/50-60°E) des leptynites-gneiss qui détermine la forte sensibilité du versant aux éboulements et chute de blocs, cette sensibilité étant exacerbée lors de travaux d'excavation qui tendent à décompresser le versant.

On peut donc poser d'ores et déjà que les versants sur gneiss et leptynites d'orientation N-E montrent une prédisposition évidente aux éboulements et chutes de blocs. La figure n°12 localise les versants sensibles sélectionnés automatiquement en croisant l'orientation des versants et leur pente en considérant un seuil minimum de 35°:

1. le versant qui domine la RD 167 sur lequel plusieurs mouvements en bord de route se sont déjà produits.
2. Le versant entre le cimetière du Puy-St Clair et la Corrèze au sein duquel le mouvement de 1873 s'est produit. La partie haute du versant sous le cimetière a ainsi été affecté par un important éboulement en

---

<sup>4</sup> La foliation d'une roche métamorphique représente le plan de clivage de la roche résultant de sa compression. Le plan de foliation est orthogonal à l'axe de compression principal.

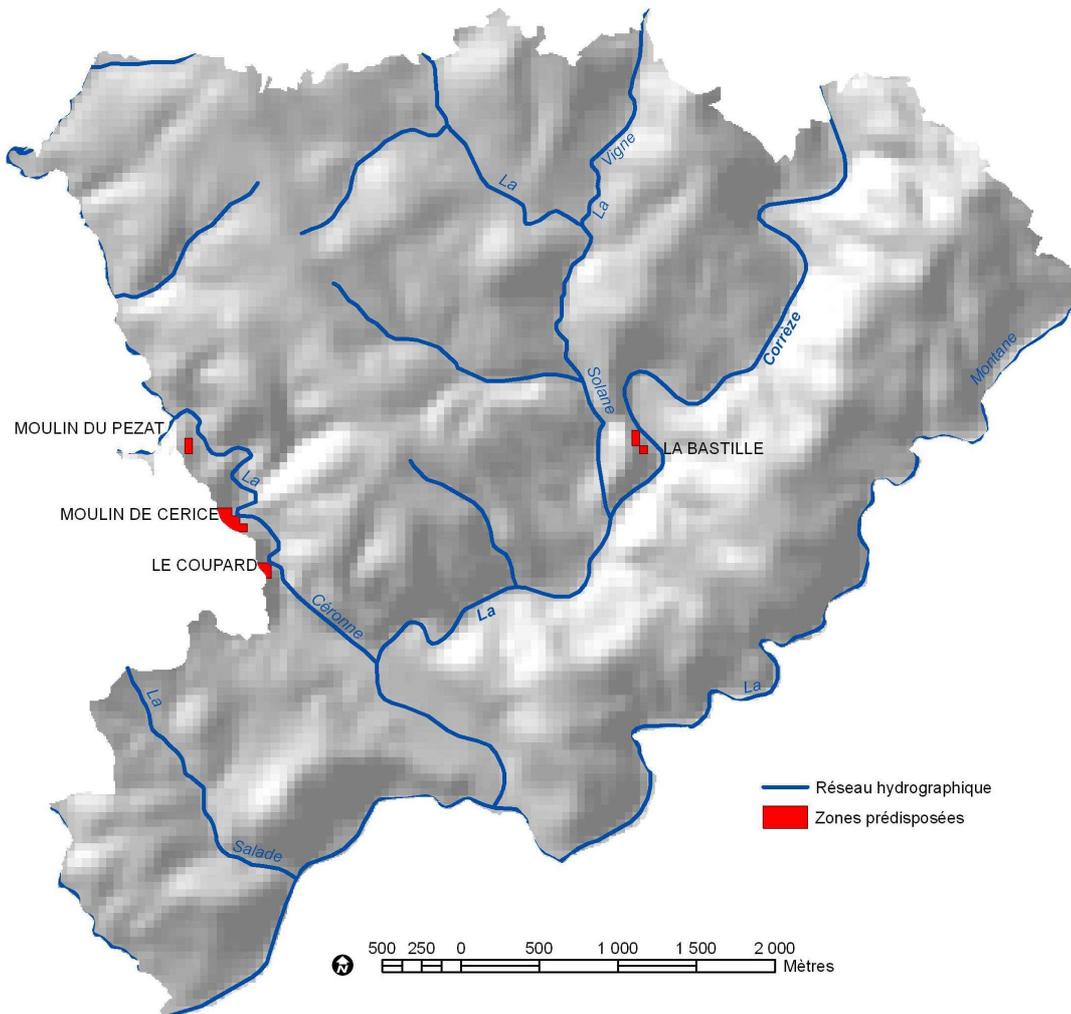


Figure n°12 : Localisation des versants sensibles au risque d'éboulements - chute de blocs par rupture sur le plan de foliation.

### 5.1.1.2 Eboulement du Puy St Clair de février 1966

Cet éboulement qui s'est produit au début du mois de février n'est pas relié à un épisode pluvieux particulièrement intense. L'analyse de la pluviométrie du mois de janvier 1966 montre cependant un cumul de 131,1 mm dont 84,2 mm entre le 19 et le 27 janvier. L'intégration de la pluviométrie des mois de novembre et décembre aurait été intéressante pour vérifier l'hypothèse d'un cumul anormal sur une longue période. A la suite de cet éboulement, des travaux de confortement ont été réalisés sur le talus dominant la rue de la Bastille (mur en pierres maçonnées).

La rupture s'est produite principalement sur la foliation qui est ici plus oblique au plan du versant (N110/55°E et N140/40°NE respectivement) que pour le site précédent. Les discontinuités fracturales servent secondairement de surfaces de rupture.

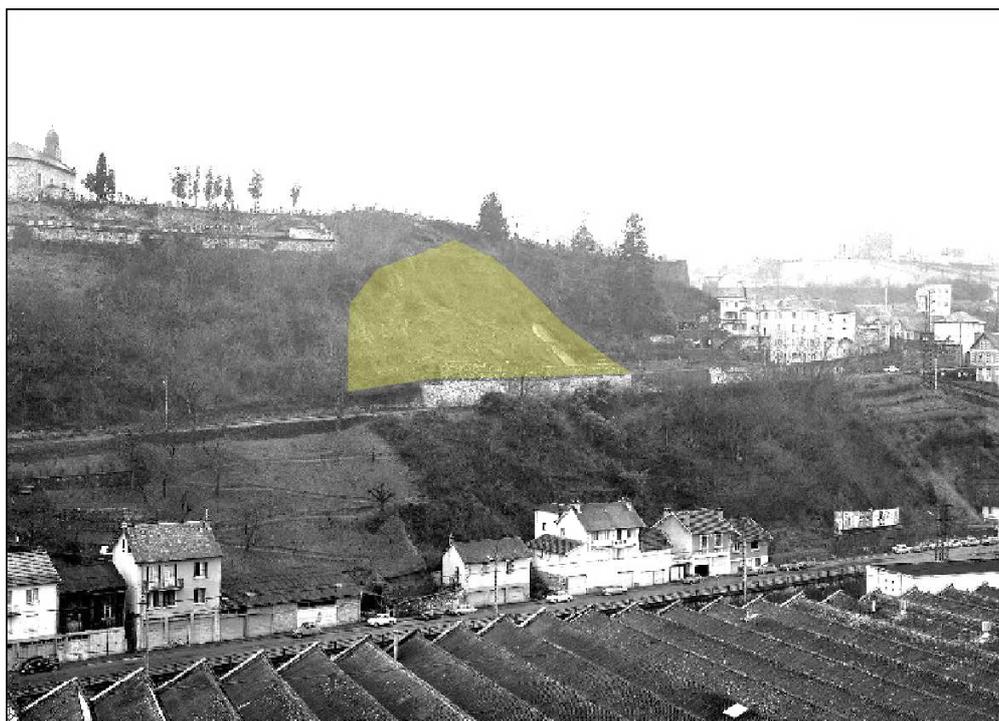


Figure n°13 : Éboulement (surfacée jaune) du versant sous le cimetière du Puy St-Clair :  
photo prise en 1969 après les travaux de stabilisation ;  
Archives Départementales de la Corrèze

Postérieurement à cet événement, une habitation a été construite au nord immédiat de l'éboulement (n°35 rue de la Bastille). Ce bâtiment est actuellement contraint par un éboulement analogue à celui de 1966, les matériaux éboulés pouvant atteindre directement le toit.

### **5.1.2 Données d'observation**

Les sites contraints par des éboulements-chutes de blocs étant bien connus, certains ayant fait l'objet de travaux de protection par la Ville de Tulle (clouage, grillages etc.) ou de prévention (condamnation du trottoir sur la rue Anne Vialle), on se centrera sur les secteurs qui nécessitent une attention particulière.

#### 1. Ancien hôtel des Rochers

Bien que la falaise ait fait l'objet de travaux de stabilisation, la hauteur importante de l'escarpement (35 à 40 m), la présence d'écoulement d'eau et la forte densité de la fracturation prédisposent ce site à des éboulements - chutes de blocs pouvant être importants. L'usage actuel en parking de la zone de réception de blocs éboulés limite les risques mais l'atteinte des bâtiments situés à une quinzaine de mètres de l'escarpement est possible. Une surveillance régulière du site est donc nécessaire pour prévenir par des purges les chutes de blocs ou des éboulements.

2. Avenue de Ventadour, n°21 à 33

L'escarpement mesure environ 25 de hauteur. Les bâtiments établis au pied même de la paroi sont extrêmement vulnérables à des chutes de blocs et bien sûr à des éboulements. Une visite à l'arrière du n°31 montre la présence d'un gros bloc (150 cm x 65 cm x 50 cm) tombé récemment entre le bâtiment et la paroi. La chute d'un tel bloc depuis le haut de la paroi provoquerait de gros dégâts sur l'habitation.

3. Avenue de l'Estabournie



En amont immédiat de l'immeuble des Assedic, un éboulis de pied de paroi est susceptible de libérer des blocs dont le roulement sur le trottoir en contrebas peut atteindre les piétons.

La rehausse du mur bordant le trottoir suffirait à contrôler le risque.

Figure n°14 : éboulis de pied de paroi en amont de l'Assedic.

4. Bas de l'avenue Malaquin

Le bas de l'avenue Malaquin est dominé par un escarpement rocheux (leptynites) qui a fait l'objet de travaux de stabilisation (clouages, filets pare-blocs, grillages). L'analyse du site montre l'existence d'un risque d'éboulement par rupture sur le plan de foliation et disjonction du réseau fractural concernant un volume compris entre 200 et 1000 m<sup>3</sup>.

La foliation est disposée N 145 / 35 NE. On observe très bien l'un des plans de foliation sur la figure n°15, qui a été découvert par des chutes de blocs en pied de l'escarpement.

Le relevé de fracturation sur le site permet de distinguer 4 familles de fractures :

- ⇒ N 030 à 065 / 60° SE à 90 : il s'agit probablement d'un système de fractures conjuguées. Cette famille est la plus importante et montre des distances interfracturales de 5 à 10 cm.
- ⇒ N 140 à 155 / 65 à 85 SE
- ⇒ N 115 / 80 SW ; cette direction est celle de l'escarpement de la cour de l'Assedic.
- ⇒ N 170 / 60 E qui constitue des plans très longs (figure n°15).



Figure n°15 : escarpement du bas de l'avenue Malaquin

L'intensité de la fracturation des leptynites et la disposition de la foliation sont donc favorables à la rupture de ce volume rocheux. Le clouage permettrait de limiter fortement ce risque.

## **5.2 Les glissements dans le massif rocheux**

Deux glissements rocheux importants ont été cartographiés : glissements du versant de Pra-Limouzy et du versant de l'Auzelou. Par ailleurs, le versant du Haut de Monteil montre un talus très marqué au-dessus du chemin qui traverse le versant depuis la ferme. Il est possible que ce versant soit également glissé mais les données morphologiques sont insuffisantes pour conclure.

⇒ Le glissement du chemin de la Brousse à Pra Limouzy

*Il est révélé par un talus de rupture très net qui domine le chemin de la Brousse. Ce talus atteint au centre du glissement une hauteur de 3 à 4 m.*



Figure n°16 : Talus de rupture du glissement du chemin de la Brousse

*Le corps du glissement ne montre pas de talus secondaire ce qui conduit à faire l'hypothèse d'un glissement à surface de rupture unique (figure n°17).*

*La surface de rupture est probablement calée sur la foliation des leptynites disposée N 140-150 / 45 – 55 NE, le versant étant donc sub-parallèle à la foliation (figure n°18). La fracturation permet une rupture en dièdre sur les familles N.115 et N.170 et par décollement-décrochement sur les familles N.050 et N.145 (figure n°18).*

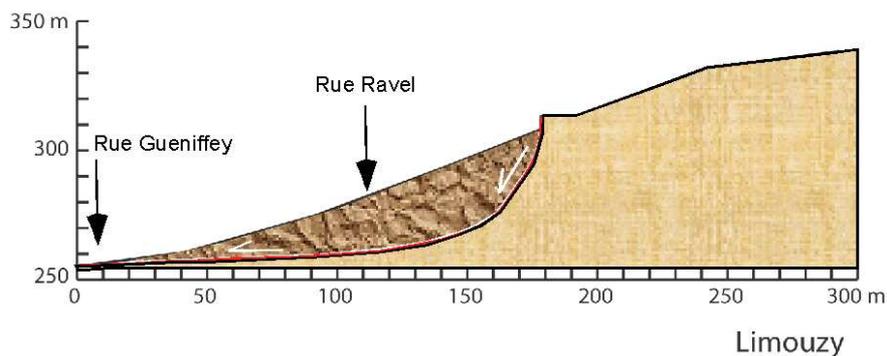


Figure n°17 : coupe du glissement du chemin de la Brousse

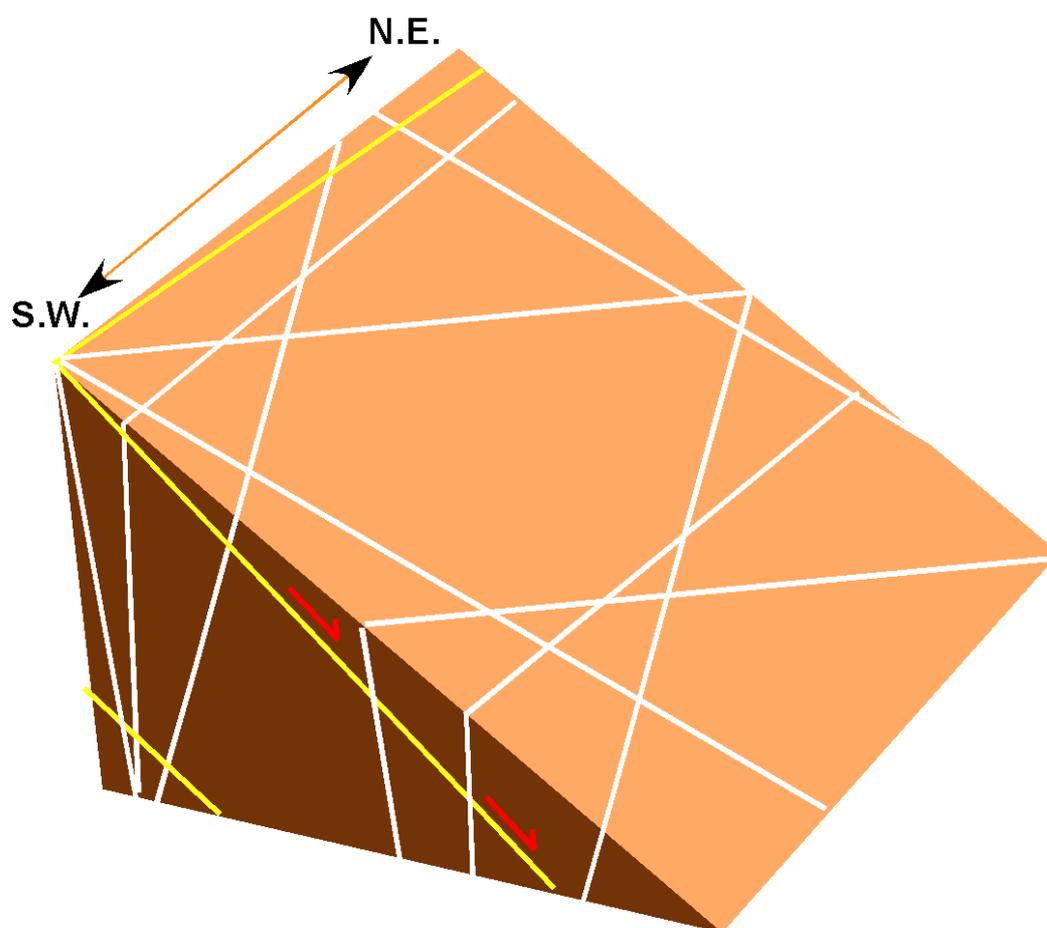


Figure n°18 : contexte structural du glissement du chemin de la Brousse.  
foliation : ligne jaune ; fracturation : ligne blanche.  
(les distances entre fractures ne sont pas réelles).

Les limites inférieures du glissement sont incertaines du fait de l'urbanisation mais il semble s'amortir au niveau de la rue Gueniffey. La superficie du glissement est de l'ordre de 2 ha.

Des investigations conduites sur les habitations situées sur le corps du glissement indiquent des rejeux chroniques dont l'importance réelle (rejeu du glissement lui-même ou rejeu localisé du fait du tassement des terrains au niveau du bâti ?) mériterait d'être évaluée par une instrumentation (inclinométrie). Boulevard Joseph Roux, on observe ainsi une fissuration importante et évolutive aux n°20 et 18 qui sont des maisons d'une quarantaine d'années et au n°16, maison récente (< de 5 ans), dont le garage est fortement fissuré. Au n°11 rue Ravel, les déformations semblent résulter d'un cisaillement dans l'axe de la pente qui fissure la chaussée du Bd J. Roux, déforme le mur de clôture et fissure fortement la maison sur l'angle N.W.



Figure n°19 : Fissuration de l'angle N.W. de la maison au n°11 rue Ravel

⇒ Le glissement de L'Auzelou

Ce glissement d'une douzaine d'ha de superficie est identifié du fait de la présence d'un talus très marqué qui domine le rang supérieur de maisons de la rue J.J. Rousseau. Ce talus peut dépasser 10 m de haut avec une inclinaison forte ( $> 50^\circ$ ).

En amont de ce talus principal, on observe une série de 4 talus de hauteur plus réduite. Ce dispositif permet d'établir la géométrie du glissement (figure n°21) et de proposer une hypothèse cinématique : glissement du volume en aval du talus principal, sous contrôle des variations piézométriques au pied de versant influencées par le niveau des crues de la Corrèze. A la suite, le glissement a régressé vers l'amont.

Il est remarquable de constater que ce glissement se produit dans un massif de roches éruptives (hornblendites) qui ne sont pas a priori sensibles au glissement. Les observations faites dans le sous-sol du n°58 de la rue J.J. Rousseau montrent l'importance de la fracturation du massif rocheux avec des directions de fractures sub-parallèles au versant (N 060-070 / 50-55 S.E. et N 110 / 50-55 S.) qui constituent les surfaces de rupture dont dérivent les différents talus (figure n°22). Mais surtout, on observe une très forte altération superficielle des hornblendites qui sont « fantômes » (aspect mou et argileux) sur près d'un mètre d'épaisseur. Cette altération est liée à l'importance des circulations d'eau visible en sous-sol, ce qui conduit à estimer que les joints de fractures sont potentiellement fortement altérés en profondeur, les argiles d'altération constituant un lubrifiant idéal pour le glissement.

Actuellement, il est difficile de se prononcer sur le degré de mobilité du glissement. Nous n'avons pas relevé d'indices probants de déformations anormales sur le bâti. Seul les problèmes de stabilité du talus sous la rue de Lauradour motivant des travaux de confortement importants (mur béton) montrent la sensibilité de ce type de terrain lors d'aménagements. Par ailleurs, des travaux de terrassement sur le talus principal au n°62 de la rue Jean Jacques Rousseau ont provoqué un éboulement du talus obligeant à un confortement par un mur en béton qui est lui-même en cours de déformation.



Figure n°20 : Talus principal du glissement de l'Auzelou côté est

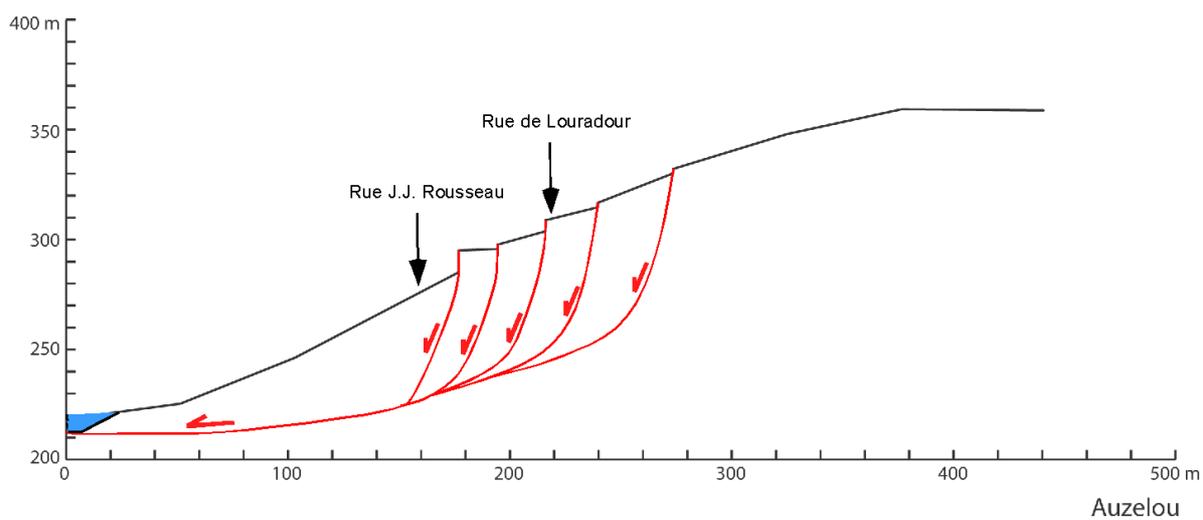


Figure n°21 : Coupe du glissement de l'Auzelou

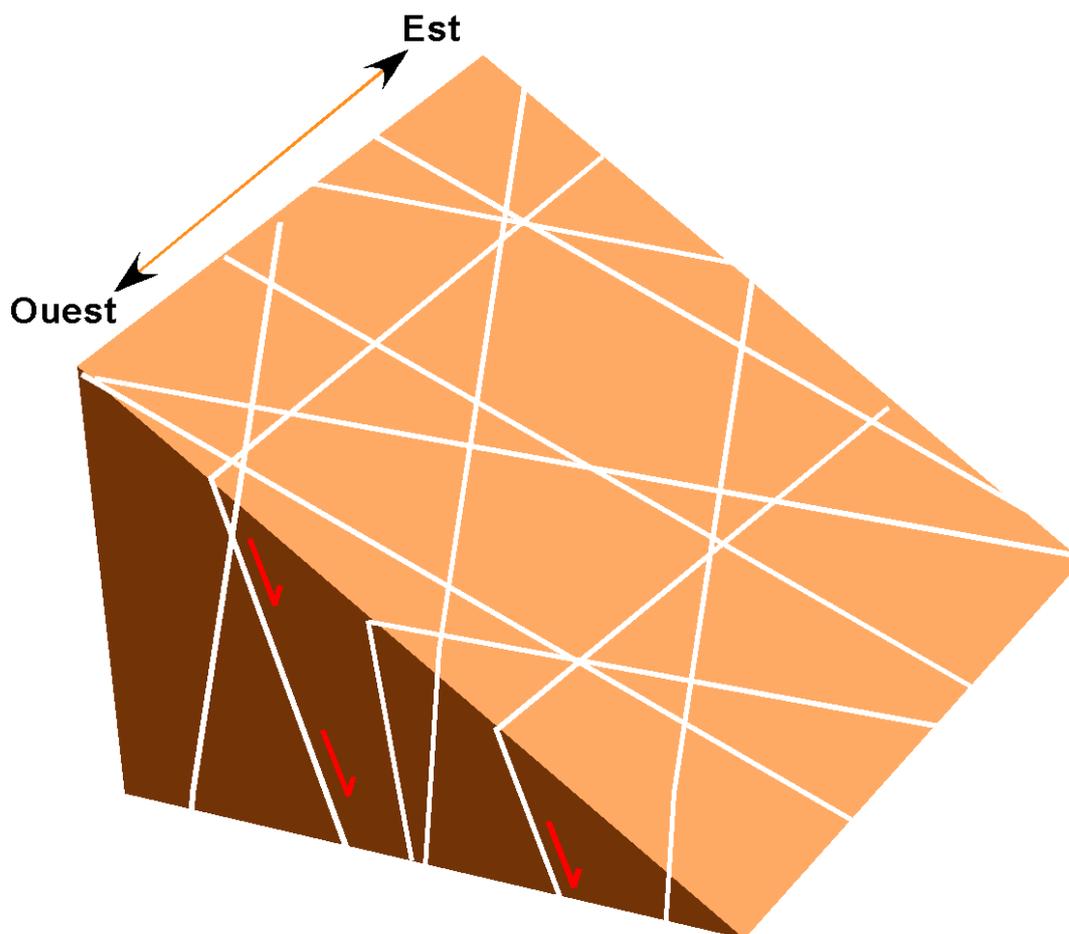


Figure n°22 : contexte structural du glissement de l'Auzelou.  
fracturation : ligne blanche. (les distances entre fractures ne sont pas réelles).

### **5.3 Les glissements superficiels - coulées de débris**

Les glissements superficiels et les coulées de débris associés se manifestent clairement sur le territoire de Tulle sur une période de temps d'une quarantaine d'années. Ils sont clairement déterminés par des épisodes pluvieux de forte intensité (octobre 1960 et juillet 2001) ou associés à des pluies de faible intensité mais dans un contexte piézométrique défavorable induit par des cumuls importants de pluies antécédentes (janvier 1994).

#### **5.3.1 L'épisode de 1960**

L'épisode pluvieux d'octobre des 3 et 4 octobre 1960 a provoqué régionalement (Corrèze, Lot et Dordogne) des inondations très importantes qui constituent sur de nombreux cours d'eau la référence des P.H.E.C. (Plus Hautes Eaux Connues). Le tableau suivant rappelle les valeurs de pluie de l'épisode en Corrèze pour le 3 octobre 1960.

Date	Lieu	Valeur (mm)	Durée réelle (h)
<b>03/10/1960</b>	Millevaches	200	
	Gentioux-Pigerolles	195	
	Bugeat	193	
	St-Yrieix le Dejalat	180	
	Corrèze	180	
	Bar	180	
	Tulle	124,5	

Figure n°23 : pluviométrie du 3 octobre 1960.

Les archives et les témoignages de riverains montrent que de très nombreux glissements superficiels suivis ou non de coulées se sont produits. Deux versants ont été particulièrement touchés : Pra-limouzy et l'Auzelou-Louradour.

### 5.3.1.1 Pra-Limouzy

Un glissement dont le volume approximatif est de l'ordre de 5000 à 10 000 m<sup>3</sup> a emporté la chaussée du boulevard Joseph Roux en aval immédiat du n°28 non-existant à l'époque. Le glissement se situe dans l'enveloppe d'un glissement plus important et donc antérieur dont la marge rive droite est très nette (côté lycée). La topographie (pente à 25° sous la route), l'hydrogéologie (écoulement d'une source pérenne) et la route dont la pente est dirigée vers la zone du glissement sont autant de facteurs favorables à l'instabilité superficielle.

Actuellement, la zone du glissement est occupée par plusieurs pavillons donc l'hydrologie du versant est modifiée (imperméabilisation, aménagements de terrasses de jardin ; figure n°24).. Au niveau de la niche de glissement, la route a été stabilisée par un mur en pied de talus et un drain longitudinal enterré semble avoir été construit (figure n°24).



Figure n°24 : glissement-coulée de Pra-Limouzy :  
la flèche indique la maison au niveau de laquelle la coulée s'est arrêtée.  
En bas, les travaux de stabilisation du boulevard Joseph Roux en 1962  
(photo La Montagne, Archives Départementales de la Corrèze).

### 5.3.1.2 Lauradour – L'Auzelou

En l'absence de relevés précis disponibles et de photos, il est difficile de connaître exactement le nombre et l'ampleur des mouvements de terrains ayant affectés le versant. Les témoins de l'époque indiquent que plusieurs glissements se sont produits. Les mouvements bien identifiés se situent au niveau des n°1 et 3 de la rue Guynemer :

- Au n°3, une coulée ( $\approx 100 \text{ m}^3$ ) a traversé la maison entrant par la cuisine à l'amont. L'aménagement en terrasse du versant en amont de la maison réduit

probablement le risque de coulée actuellement, sauf déstabilisation d'un mur (figure n°25). La pente initiale du versant sur la zone de glissement est de l'ordre de 30°. La pente en aval est de l'ordre de 27 à 25°.



Figure n°25 : versant en amont du n°3.

- Au n°1, une coulée s'est bloquée dans le jardin en amont immédiat de la maison qui n'a pas été touchée (présence d'ouverture en R0 avec une chambre).

### 5.3.2 L'épisode de janvier 1994

Un recensement précis des désordres ne semble pas avoir été réalisé à l'époque. Deux phénomènes sont connus : l'effondrement d'un mur rue Maximin Deloche (5 janvier 1994) et une coulée de boue sur le versant du Colombier ayant envahi le jardin à l'arrière du n°16 de la rue Pauphile sans atteindre la maison selon un témoignage. Cette coulée est liée à un glissement superficiel survenu le 2 ou le 3 janvier prenant naissance au niveau d'un chemin horizontal à mi-versant desservant une maison secondaire dont l'accès ne fut jamais rétabli.

Ces mouvements superficiels (il y eut probablement plusieurs glissements sur les talus routiers, entre autres mouvements non recensés), sont associés à une pluviométrie de faible intensité/longue durée qui conduit à une saturation des sols. Le cumul de pluie à Tulle sur le mois de décembre atteint 266,3 mm et la première semaine de janvier 1994 reçoit 92 mm d'eau (figure n°26).

Le cumul du mois de décembre est dans l'ordre de grandeur de la pluie critique calculée sur la formule empirique de Corominas et Moya (voir annexe) soit 261 mm. Cette formulation empirique semble donc s'appliquer sur les versants de Tulle pour évaluer les épisodes de pluie critique de faible intensité / longue durée.

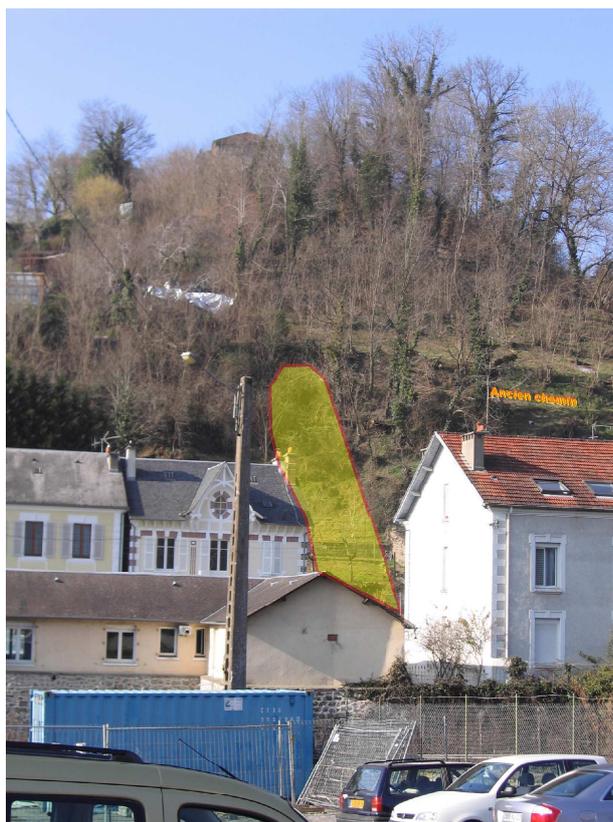


Figure n°26 : localisation de la coulée du Colombier de janvier 1994.

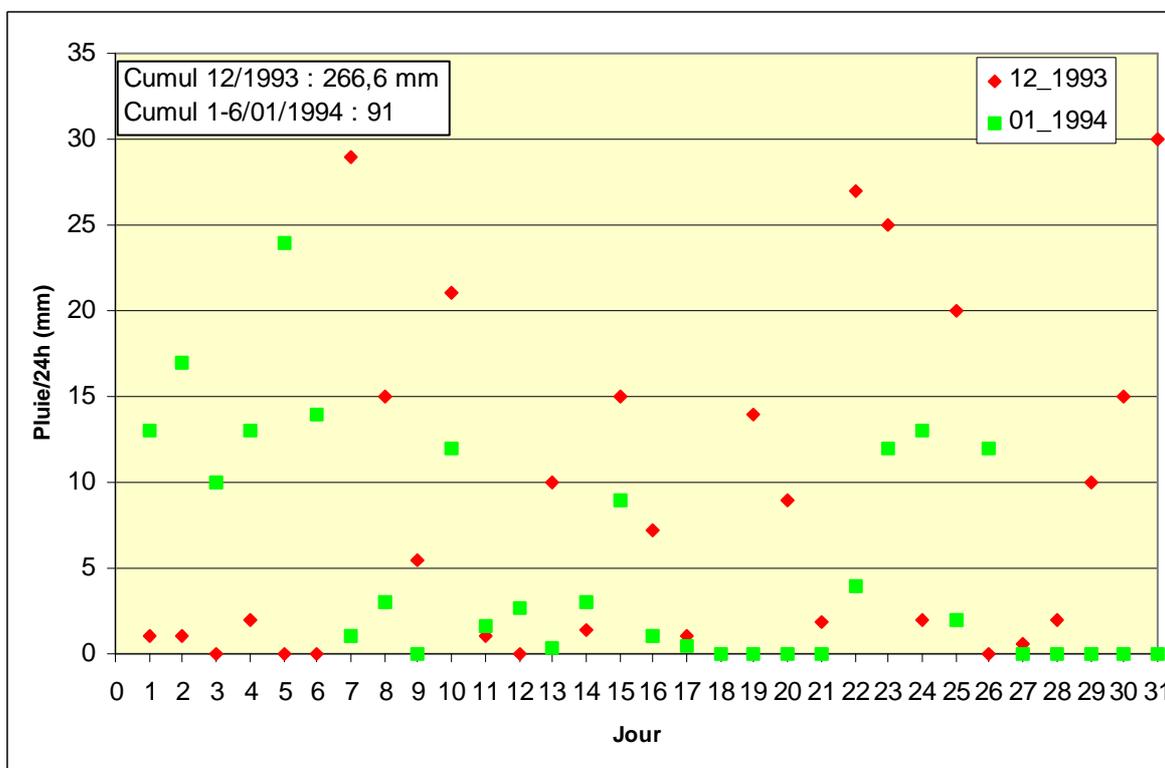


Figure n°27 : pluviométrie journalière des mois de décembre 1993 et janvier 1994 à Tulle.

### 5.3.3 L'épisode de juillet 2001

La coulée des Fages (figure n°28) constitue évidemment le phénomène majeur de cet épisode.



Figure n°28 : la coulée du 5 juillet 2001 sur la face amont de l'HLM des Fages (photo La Montagne, Archives Départementales de la Corrèze)

L'analyse du phénomène a fait l'objet d'une étude détaillée dans le cadre de l'expertise judiciaire<sup>5</sup>. Le glissement s'est produit au niveau d'une rupture de pente au sein de formations superficielles argileuses (altérites du substrat gneissique) présentant localement une forte épaisseur (  $\approx 3$  m). Le volume mobilisé est de l'ordre de 400 à 500 m<sup>3</sup>. Le bâtiment HLM se trouvant à quelques mètres du pied de versant, la coulée s'est bloquée sur la face amont.

Plusieurs éléments fondamentaux de l'expertise doivent être retenus :

1. Le calcul de stabilité indique que le terrain demeure stable à saturation d'eau, le modèle donnant  $F$  (facteur de sécurité) = 1.31 (rupture avec  $F \leq 1$ ). On verra que dans ce contexte, le modèle d'analyse de la stabilité des terrains superficiels appliqué dans le cadre de la présente étude considère également le secteur du glissement de 2001 comme stable.
2. Pour obtenir  $F = 1$ , il est nécessaire d'intégrer une poussée hydraulique de 70 kPa à l'interface sol – substrat rocheux, cette poussée provenant de surpression d'eau au sein du réseau de discontinuités du massif rocheux.
3. Le glissement est de type plan, la surface de rupture se situant au contact du rocher.

---

<sup>5</sup> Rapport d'expertise de M. Fuchs et M. Pouget , Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand. 2001.

4. La pente en aval du glissement initiale présente un premier segment de 4 m penté à  $25^\circ$  au niveau duquel la transformation en coulée a pu se faire immédiatement par liquéfaction, l'un des trois mécanismes opérant lors de la formation d'une coulée après glissement (Iverson et *al*, 1997).

5. En l'absence de caniveau au bas de la rue Marie Laurent, des écoulements importants se sont rejetés sur le versant en amont de la zone du glissement initial, accroissant artificiellement les apports pluvieux sur le secteur. Une zone d'humidité dans les terrains sous la route est ainsi visible sur les images aériennes de 1999 et 2004.

6. Le mouvement se produit vers minuit le 6 juillet immédiatement après le dernier pic de pluie (20 mm entre 21h -23h) qui survient après un cumul de 187 mm en 25 h. On met ainsi en évidence un effet seuil pluviométrique très net.



Figure n°30 : niche de glissement à Pra-Limouzy attribué aux pluies des 4-5 juillet 2001

D'autres glissements et coulées sans conséquences autres que matérielles se sont produites affectant en particulier les talus routiers. L'occurrence d'une petite coulée sur le versant de l'Auzelou dans la partie amont du n°60 de la rue J.J. Rousseau et la présence d'une petite niche de glissement (volume  $\approx 50 \text{ m}^3$ ) dans la partie supérieure du versant de Pra-Limouzy (pente  $25^\circ$ ) attribuée à la pluie de juillet 2001 (figure n°30) du fait de la fraîcheur de la forme, montrent que ces versants ont une prédisposition très claire aux glissements superficiels.

## 6. Analyse des aléas

L'analyse des aléas est principalement consacrée à l'évaluation de l'aléa glissement superficiel-coulées de débris. L'évaluation de l'aléa pour les autres phénomènes est traitée plus sommairement.

### 6.1 Aléa éboulements - chutes de blocs

L'échelle de gradation des aléas classiquement utilisée dans les Plans de Prévention des Risques Naturels Prévisibles, distingue trois niveaux : fort / moyen / faible. Conformément à l'approche des PPR, l'existence de dispositifs de protection n'est pas pris en compte.

On a considéré que l'aléa éboulements – chutes de blocs est généralement fort sur les sites répertoriés présentant des hauteurs de parois supérieures à 10 m. Parmi ces sites, le versant au droit du moulin de Cerice dominant la RD 167 présente une forte susceptibilité pour développer des éboulements potentiellement importants du fait de la pente du versant ( $30-40^\circ$ ) et de sa conformité avec le plan de foliation des leptynites. Plusieurs éboulements en bas de talus se sont produits après des épisodes pluvieux.

Pour les autres sites, l'aléa est considéré comme faible (escarpement de l'intersection des avenues W. Churchill et de Lorraine) à moyens (talus d'éboulis en amont de l'ASSEDIC rue de l'Estabournie ; boulevard Jean Audiou à La Fajeardie).

### 6.2 Aléa glissements rocheux

**Pour le glissement de l'Auzelou**, en l'absence d'indice de mobilité historique patent (déformations sur les constructions), l'aléa est considéré comme faible. Cependant, comme pour toutes zones glissées, des aménagements imprudents tels que des talutages et excavations, sont susceptibles de réactiver localement le glissement du fait des caractéristiques mécaniques potentiellement médiocres des terrains. Par ailleurs, une modification de l'hydrologie du versant (rupture d'une canalisation EP/EU) peut également réactiver tout ou partie du glissement en fonction de la piézométrie initiale des terrains (contexte saisonnier).

**Pour le glissement de la Brousse à Pra-Limouzy**, les déformations constatées sur les pavillons n°16-18-20 de l'avenue Joseph Roux, sur la chaussée de l'avenue et au n°11 rue Ravel indiquent très probablement une activité chronique du glissement au moins dans son

secteur amont qui présente une pente importante. Il est donc justifié de considérer un aléa moyen sur ce secteur voire un aléa fort en amont de la zone actuellement construite. Cette partition pourrait être retenue dans le cadre d'un futur PPR. Sur la partie basse du glissement à moindre pente, l'aléa est considéré comme faible en l'absence de déformations sur le bâti ou sur la voirie.

### **6.3 Aléa de glissements superficiels – coulées de débris**

Les fondements scientifiques de la méthode d'étude de l'aléa de glissements – coulées de débris font l'objet d'une analyse détaillée annexée en §10 en fin de rapport.

L'évaluation de l'aléa de glissements – coulées de débris met en œuvre différentes phases :

1. Calcul de la pluie critique de déclenchement de glissement superficiel : calage du modèle informatique.
2. Détermination des seuils pluviométriques pour les différents niveaux d'aléas.
3. Cartographie de l'aléa glissement superficiel
4. Evaluation de l'aléa coulée de débris sur le bâti et cartographie de l'aléa coulée de débris sur le bâti.

La phase 4 relève d'une démarche à dire d'expert car on ne dispose pas actuellement d'une théorie, et donc d'outils opérationnels, capable de prédire l'aléa de formation d'une coulée de débris après un glissement superficiel. De plus, spatialement on ne peut pas pour l'instant automatiser le lien entre la zone de déclenchement d'un glissement la plus probable et l'incidence vers le bas du versant d'une coulée en dérivant. En outre, il faudrait systématiser la modélisation de la propagation d'une coulée de débris ce qui suppose un alourdissement considérable du travail.

Le modèle de Montgomery et Dietrich (1994) est utilisé du fait de sa relative simplicité et de sa validation sur une zone-test de 3000 km<sup>2</sup> qui permet d'en connaître les limites effectives (Montgomery et al, 1998). On en expose les principaux éléments.

#### **6.3.1 Présentation du modèle de Montgomery et Dietrich**

L'hypothèse centrale du modèle est que le **facteur topographique** constitue le principal facteur de déclenchement. A la suite, l'intégration des données topographiques sur un territoire important (à l'échelle d'un département p.ex.) peut se faire automatiquement à l'aide de MNT et sous SIG. La contrepartie évidente est que les autres facteurs doivent être considérés suffisamment invariants pour faire l'hypothèse de valeurs communes d'un site à l'autre.

Le modèle combine un modèle hydrologique de propagation des écoulements en subsurface (dans les formations superficielles meubles assimilables en terme géotechnique à un sol) et un modèle mécanique.

**Le modèle hydrologique** est basé sur l'hypothèse d'un **état stationnaire ou invariant** des conditions hydrologiques sur un versant évaluées en considérant que l'aire spécifique de drainage contrôle la valeur de l'écoulement de subsurface en tous points (O'Loughlin, 1986). Cette hypothèse nécessite théoriquement l'équilibre en chaque point des conditions d'écoulement de sub-surface ce qui est une simplification de la réalité, ces conditions étant rarement atteintes en particulier durant les périodes sèches.

**Le modèle mécanique** utilise la théorie de la pente infinie qui s'applique bien à l'analyse de la stabilité des formations superficielles de faible épaisseur ( $\approx 1-5$  m) pour lesquelles les conditions de stabilité en pied du versant sont indifférentes (l'épaisseur du sol est petite par rapport à la longueur du versant). La théorie de la pente infinie repose sur plusieurs simplifications. En particulier, il s'agit d'un modèle de rupture unidimensionnel qui fait l'hypothèse que la rupture se produit sur un plan et néglige les forces latérales.

**Le test de validité du modèle** montre qu'il explique 76 % des 3224 glissements recensés. Parmi les 24 % de cas aberrants pour lesquels les terrains sont théoriquement stables, la moitié est située sur le réseau routier dont l'incidence péjorative sur la stabilité a déjà été évoquée. Le restant s'explique, d'une part, du fait de conditions géologiques très particulières, pour lesquelles les valeurs de cohésion et de frottement interne « standards » ne sont pas adéquates, d'autre part, du fait d'un niveau de précision insuffisant du MNT utilisé. Plus accessoirement, certains mouvements superficiels sont inclus dans des mouvements de grande ampleur, ce qui implique des propriétés hydrogéotechniques anormales.

### **6.3.2 Calage du modèle et détermination des valeurs de pluie critique de déclenchement des glissements superficiels**

Le calcul de la pluie critique suppose initialement un calage satisfaisant du modèle informatique.

Le modèle suppose la détermination de 4 paramètres :

1. La transmissivité hydraulique ;
2. L'angle de frottement interne ;
3. La cohésion (sol + racines);
4. La profondeur du sol.

Pour les 3 premiers paramètres, on peut effectuer soit des mesures *in-situ* et/ou des essais en laboratoire, mais également utiliser les valeurs mesurées ou déduites issues d'études géotechniques locales. Différemment, on peut également attribuer des valeurs plausibles et tester leur combinaison dans le modèle en comparant les résultats à la réalité de l'instabilité superficielle déduite des données historiques. C'est cette dernière approche qui a été retenue pour sa simplicité. Cependant, les quelques études géotechniques réalisées à Tulle ont été également utilisées.

Pour paramétrer la cohésion, on a fait le choix de ne pas intégrer le rôle cohésif du système racinaire des arbres, car il est très variable d'une essence à l'autre et en fonction de l'âge

des peuplements. Ce choix peut expliquer sur les secteurs boisés des valeurs de pluie critique anormalement faibles (voir ci-dessous).

Après différentes simulations sur différentes combinaisons de valeurs, on a retenu :

Transmissivité hydraulique :  $T = 100\text{m}^2/\text{jour}$  ; Angle de frottement interne :  $\phi = 35^\circ$  ; Cohésion :  $C = 5\text{ kN/m}^2$ .

Pour la profondeur des sols, des sondages et observations de coupes sur une trentaine de sites ont conduit à retenir une valeur moyenne de 1 m.

### 6.3.3 Résultats

L'évaluation de la qualité de la modélisation des zones sensibles aux glissements de terrains est faite à 3 niveaux :

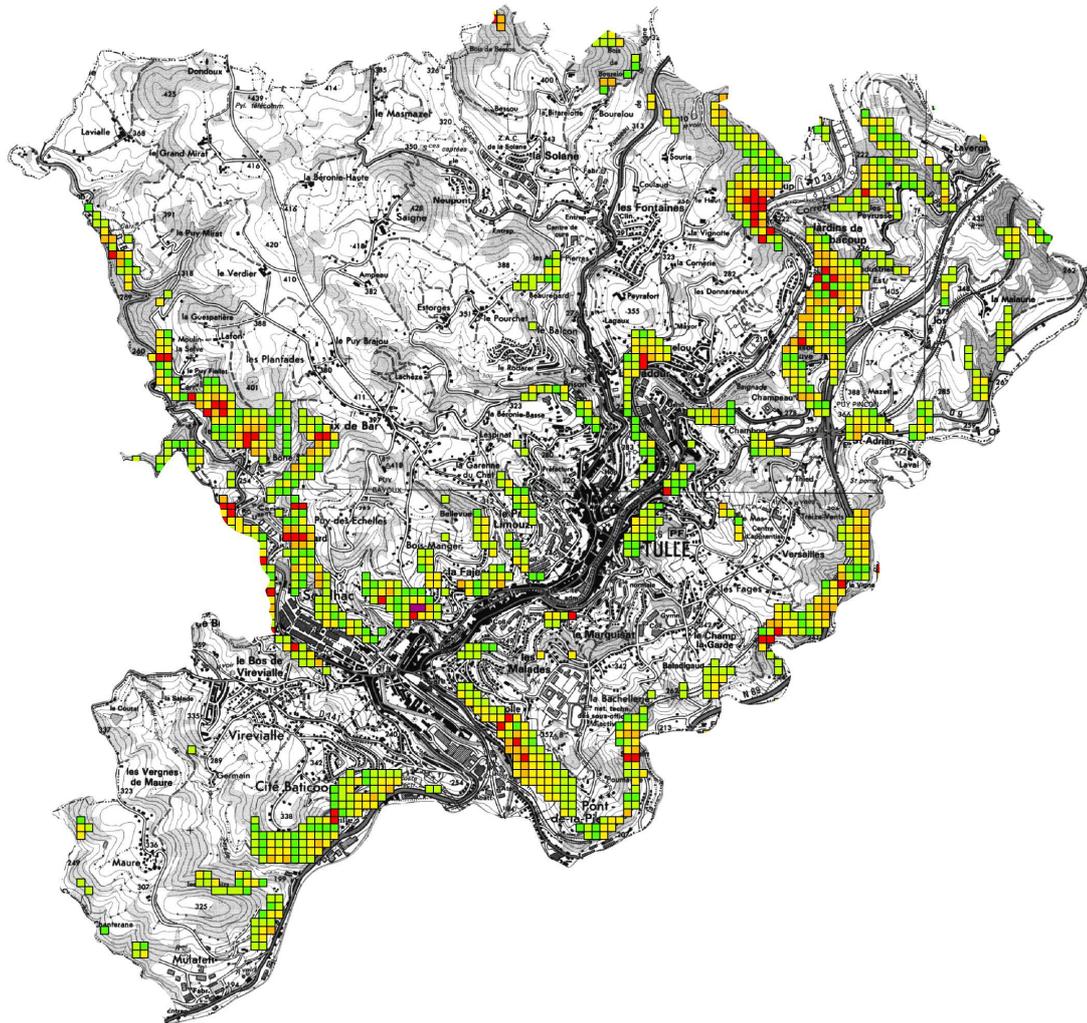
1. **cohérence globale** : les durées de retour attribuées aux zones sensibles aux glissements superficiels sont-elles compatibles avec l'occurrence des phénomènes sur la zone d'étude ?
2. **Analyse sectorielle pour les mouvements historiques** : les mouvements historiques sont-ils détectés et dans l'affirmative, les durées de retour de la pluie critique sont-elles conformes à la réalité ?
3. **Analyse sectorielle sur les sites à faible durée de retour sans événement historique connu.**

#### 6.3.3.1 Cohérence des résultats à l'échelle globale

La figure n°31 (page suivante) restitue les données calculées de pluies critiques et leur durée de retour. Les résultats sont évalués à partir de la figure n°32.

- ⇒ **Pour 76 % des surfaces sensibles au glissement superficiel, les pluies critiques ont une durée de retour  $\geq 100$  ans et 44 % des surfaces sensibles les pluies critiques ont une durée de retour  $\geq 1000$  ans.** Le modèle attribue donc majoritairement des durées de retour rares à exceptionnelles ce qui restitue bien la réalité historique et la perception « empirique » que l'on peut avoir des phénomènes sur la commune de Tulle. Les épisodes pluvieux de 1960 et 2001 qui ont provoqué des glissements superficiels et des coulées de débris ont des durées de retour de l'ordre de 100 et 500 ans respectivement.
- ⇒ **Pour 24 % des surfaces sensibles les pluies critiques ont une durée de retour  $< 100$  ans, dont 10 % ont une durée de retour  $< 10$  ans et 4 % ont une durée de retour de pluie critique  $\leq 1$  ans.** Pour ces secteurs représentant donc un peu moins de 25 % des surfaces sensibles au glissement superficiel, le modèle attribue des durées de retour anormalement faibles par rapport à la réalité historique. On analyse à la suite les causes objectives de ces anomalies (7.3.2.2).

Figure n°31 : Valeurs calculées de la pluie critique

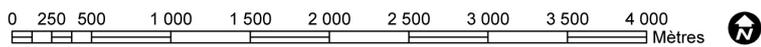


Valeurs de pluies critiques (mm/jour)

- Sup. à 400
- 200 - 400
- 100 - 200
- 50 - 100
- 1 - 50
- Inconditionnellement instable

Paramètres pris en compte :

- Transmissivité du sol :  $100 \text{ m}^2 \cdot 24\text{h}^{-1}$
- Cohésion :  $5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$
- Angle de frottement interne :  $35^\circ$



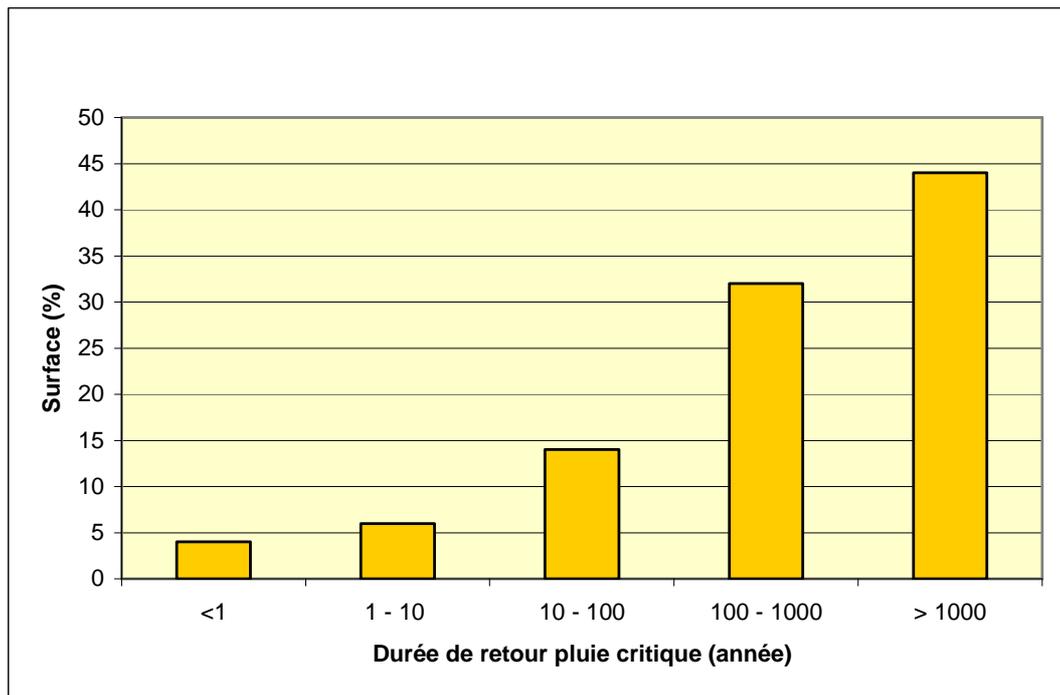


Figure n°32

### 6.3.3.2 Cohérence historique

Deux types d'erreurs sont possibles : non détection d'événements historiques ; attribution de durées de retour inadéquates (trop courtes ou trop longues).

#### 6.3.3.2.1 Non-détection d'événements historiques

C'est le type d'erreur évidemment le plus problématique. Les événements historiques suivants ne sont pas repérés par le modèle.

- ⇒ **Glissement initiant la coulée de débris des Fages** : l'étude de l'expertise judiciaire met en lumière le rôle-clé des surpressions à l'interface rocher-sol et donc l'incidence des circulations au sein du massif rocheux (cf.§ 6.3.3.).

*Aucun modèle prévisionniste des glissements superficiels ne peut intégrer valablement ce facteur qui est trop variant spatialement, tant du point de vue géométrique qu'hydraulique (voir p.ex. : Montgomery et al., 2002). De plus, la modélisation réalisée ici est peu performante pour les petits bassins versants relativement à la précision du MNT utilisé (pas de 50 m et précision altimétrique de +/- 5 m).*

- ⇒ **Glissement superficiel de versant de Pra-Limouzy** : attribué à la pluie de juillet 2001, il se situe sur un versant classé inconditionnellement stable par le modèle. L'observation précédente sur la précision du MNT constitue un facteur plausible d'erreur.

### 6.3.3.2 Attribution de durée de retour de pluies critiques trop longue

**Glissement de Pra-Limouzy (1960) et coulée du Colombier (1994)** : le modèle attribue des durée de retour de pluie critique / 24 h supérieures à 10 000 ans : les événements seraient donc exceptionnels et sans doute improbables dans le contexte climatique de la région du fait des valeurs de pluie critique (655 et 659 mm/j, respectivement).

**Pour le Colombier**, cette anomalie peut s'expliquer par l'imprécision du MNT par rapport à la taille du versant. De plus, rappelons que le glissement s'est produit sur un chemin (perturbation potentielle de l'hydrologie et de la stabilité superficielle du versant) **et surtout qu'il résulte d'une séquence pluvieuse de faible intensité / longue durée.**

⇒ **De ce point de vue, l'attribution par le modèle de pluies critiques exceptionnelles ne doit pas conduire à minorer ou à ignorer l'aléa sur ce type de secteur en présence d'enjeux.**

**Pour Pra-Limouzy**, l'analyse sur site montre l'existence d'une source pérenne au niveau de l'habitation située à l'ouest du glissement qui a été captée pour éviter son écoulement sur la voirie. On peut faire l'hypothèse que cette source débitait fortement en 1960 sur la route favorisant un ruissellement important qui a dû déverser sur la zone du glissement. Ceci permet d'expliquer raisonnablement le glissement pour une pluie de l'ordre de 150 mm/24h.

### 6.3.3.3 Attribution de durée de retour de pluies critiques trop courte

L'attribution de durées de retour trop courte est l'anomalie la plus fréquente au regard des données historiques. Elle s'explique par un facteur dominant ou par la combinaison de plusieurs facteurs de prédisposition au glissement superficiel : **forte pente (pente > 25-30°)** + « **grand** » **versant** constituant un impluvium important + **profil en travers concave** qui favorise la convergence des écoulements dans le sol vers le bas du versant.

**Le versant de Louradour** combine parfaitement ces trois éléments. Il est donc logique que le modèle lui attribue des valeurs de pluies critiques très inférieures à la pluie du 3 octobre 1960 responsable de plusieurs coulées de débris (< 50 mm/j pour le modèle et 150 mm/j pour la pluie réelle).

### 6.3.3.3 Analyse sectorielle sur les sites à faible durée de retour sans événement historique connu

Globalement, les résultats anormaux peuvent être expliqués par **quatre types de perturbations** pouvant se combiner et non prises en compte par le modèle :

1. **Présence d'affleurements rocheux** réduisant la continuité du sol et son épaisseur et/ou présence **d'éboulis rocheux** en lieu et place d'un sol argileux: cas identifié à Roussolle et à Borie Sèche.
2. **Forte couverture boisée** qui accentue la valeur de la cohésion (réseau racinaire) : cas de Roussolle, Borie Sèche, Bourbacoup, Cueille entre autres.

3. **Urbanisation des versants** (route, bâtis, terrassements des jardins, murs divers).
4. **Influence des discontinuités du massif rocheux** qui réduit les circulations d'eau dans le sol et augmente donc la valeur de pluie critique.

#### 6.3.3.4 Conclusion sur la validité de la modélisation

L'**analyse globale** montre que le modèle attribue très majoritairement des durées de retour rares à exceptionnelles aux surfaces désignées comme potentiellement instables par glissement superficiels ce qui est en conformité avec la perception historique des phénomènes de glissements superficiels et coulées de débris. De ce point de vue, la modélisation peut être considérée comme satisfaisante.

L'**analyse sectorielle** montre que certains phénomènes historiques ne sont pas détectés par le modèle ou que le modèle calcule des valeurs aberrantes de pluie critique. Les facteurs limitants du modèle sont d'ordre intrinsèque et extrinsèque :

- **Limites intrinsèques au modèle**, notamment :

- \* **Non-prise en compte de l'hydraulique du massif rocheux** et son interférence avec l'hydraulique du sol qui peut déterminer un glissement (cas des Fages) ou accroître la pluie critique (Louradour) ;

- \* **Non-prise en compte du réseau des routes / pistes / chemins** et plus globalement des surfaces imperméabilisés par urbanisation : mêmes incidences que précédemment ;

- \* **Non-variabilité des paramètres hydrauliques et mécaniques** : pas de prise en compte des contextes particuliers.

- **Limites extrinsèques au modèle** : Précision du Modèle Numérique de Terrain tant en plan (maille de 50 m) qu'en altimétrie (+/- 5 m). L'utilisation d'un MNT plus précis (le MNT de la BD Topo au pas de 25 m en plan et à +/- 1 m en altimétrie) doit permettre de réduire certaines aberrations concernant les durées de retour en intégrant mieux les petits bassins versants et le profil en long des versants (rupture de pente).

Compte-tenu des limites intrinsèques et extrinsèques de la modélisation, on considère à la suite de Montgomery et *al.* (1998) que le modèle permet de manière satisfaisante de détecter les zones sensibles aux glissements superficiels. Les perturbations potentielles de l'hydrologie du versant peuvent conduire à abaisser ou à accroître le seuil de pluie critique instabilisatrice. Dans le cas d'une zone urbaine telle que Tulle, l'incidence de la voirie est considérable mais on doit considérer à la suite de Montgomery et *al.* (1998) que les glissements associés aux routes sont toujours situés sur des zones intrinsèquement sensibles du fait de leur contexte topographique et géologique : une route constitue plus un catalyseur qu'un facteur déterminant de l'instabilisation par glissement. Inversement, certains secteurs modélisés à forte sensibilité peuvent devenir moins vulnérables au glissement dès que la voirie réduit la quantité d'eau effectivement réceptionnée sur un versant ou une portion de versant. De ce point de vue, le réseau pluvial en zone urbaine participe à réduire la sensibilité naturelle des terrains au glissement, ce avant saturation.

Les résultats de la modélisation doivent en tous cas être analysés au regard des données historiques, tant sur les secteurs déjà affectés que sur les secteurs sans phénomènes connus. De plus, une analyse complémentaire sur le terrain est indispensable pour jauger la situation de cas en limite des capacités d'analyse du modèle (précision du MNT en particulier).

### 6.3.4 Classement de l'aléa et cartographie de l'aléa

Le classement de l'aléa consiste à déterminer des seuils d'intensité/fréquence de pluie critique pour chacune des classes d'aléas.

#### 6.3.4.1 Classement de l'aléa

Le seuillage retenu (figure n°33) prend en compte l'intégralité des valeurs de pluies critiques ou en d'autres termes, on considère que la totalité des secteurs sensibles aux glissements superficiels selon la modélisation doit être intégrée en tant qu'aléa potentiel, y compris les secteurs à pluie critique à durées de retour exceptionnelles. Ceci est justifié par la nécessité de **ne pas exclure un aléa faible en présence d'enjeux forts** pouvant entraîner des conséquences graves (cas exemplaire de l'accident des Fages). Le seuillage de l'aléa doit donc prendre en compte des intervalles de durées de retour très importants. Par ailleurs, il est évidemment subjectif et relève à la fois de la perception / du risque et de son acceptation socio-économique.

Il paraît justifié de considérer que l'aléa fort s'applique aux durées de retour inférieures ou égales à 100 ans : cela signifie concrètement que dans l'ordre de grandeur d'une vie humaine, un secteur en aléa fort a une forte probabilité d'être affecté par un glissement superficiel.

A la suite, l'aléa moyen s'applique à l'intervalle 100 ans -1000 ans, l'aléa étant qualifié de rare (la probabilité d'occurrence minimale de se produire sur une année est d'une « chance » sur 1000).

Enfin, l'aléa faible concerne les durées de retour supérieure à 1000 ans, l'aléa pouvant être qualifié d'exceptionnel .

Niveau d'aléa	Durée de retour pluie critique	Valeur pluie critique
Fort	≤ 100 ans	≤ 147 mm
Moyen	≤ 1000 ans	≤ 255 mm
Faible	> 1000 ans	> 255 mm

Figure n°33 : critère de classement de l'aléa de glissements superficiels

Les surfaces potentiellement instables respectives des différentes classes d'aléa sont restituées sur le graphique suivant (figure n°34). On retrouve la partition présentée précédemment.

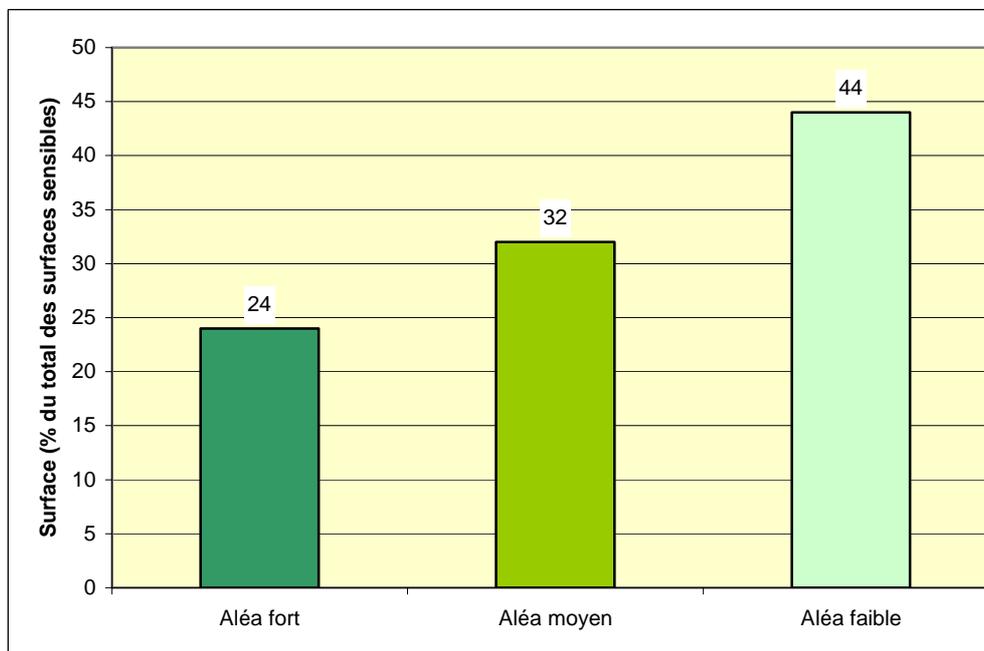


Figure n°34 : Pourcentage des surfaces sensibles par classe d'aléa

### 6.3.4.2 Cartographie de l'aléa : contrôle de terrain

La validation finale des données de la modélisation suppose un contrôle de terrain. Celui-ci s'applique en particulier sur les secteurs montrant des valeurs de pluie critique très faibles présentent une forte probabilité d'être effectivement des secteurs à forte sensibilité. Ces secteurs présentant généralement une forte pente, il est donc nécessaire de vérifier sur site :

- la présence de formations superficielles,
- leur sédimentologie (présence de matrice argileuse),
- leur profondeur,
- leur continuité spatiale sur le versant.

La modélisation désignant 324 parcelles cadastrales comme sensibles au glissement superficiel, l'analyse de terrain s'est portée prioritairement sur les sites présentant de forts enjeux. **Ainsi certains sites à aléa faible mais à forts enjeux** ont été visités (HLM de Ventadour, collectifs de la Roche Bailly, entre autres). Par ailleurs, certains sites qui présentent objectivement une forte sensibilité du fait de l'importance de la pente et de la connaissance de phénomènes historiques ont été retenus dès que la finesse de la modélisation y est insuffisante en particulier du fait de la précision relative du MNT (p.ex. : quai de Continsouza ou versant du Colombier).

Une trentaine de sites a été visitée concernant plus d'une centaine de propriétés. Ces investigations ne présentent pas toutes le même niveau de qualité. Certaines sont restées infructueuses du fait de conditions d'accès problématiques (densité de la végétation, accès périlleux) ou de conditions d'observation (absence ou médiocrité des coupes) ne permettant pas de conduire de manière satisfaisante les investigations.

En conséquence, on a fait le choix de ne pas modifier au cas par cas les résultats de la modélisation en particulier sur les zones d'aléa fort afin de ne pas introduire de biais dans la cartographie. Ce choix peut conduire à retenir l'existence d'un aléa sur certains sites qui de fait de l'absence ou de la faible continuité de formations superficielles ne sont pas en fait concernés par l'aléa de glissement superficiel et donc par l'aléa coulée de débris. L'expérience montre que si dans certains cas, l'analyse de terrain permet très sûrement de conclure à l'absence effective de l'aléa, dans d'autres cas, l'incertitude doit conduire à retenir l'existence d'un aléa.

Dans la partie d'analyse consacrée à la cartographie de l'aléa de coulées de débris sur les bâtiments, les analyses de terrains seront restituées pour mesurer l'aléa réel préalablement défini par la modélisation et les traitements associés.

### **6.3.5 Définition et cartographie de l'aléa de coulée de débris sur les bâtiments**

Dans le cadre de cette étude, on a fait le choix de limiter l'analyse de l'aléa de coulée de débris aux seuls bâtiments existants. Dans le cadre d'un Plan de Prévention des Risques de Mouvements de Terrains, il serait nécessaire d'étendre l'analyse à la totalité des terrains susceptibles d'être touchés par des coulées de débris. Après la définition de l'aléa et sa cartographie, les résultats sont confrontés aux analyses de terrains pour évaluer leur pertinence

#### **6.3.5.1 Définition de l'aléa de coulée de débris sur les bâtiments**

Il est actuellement impossible d'automatiser la cartographie de l'aléa de coulée de débris sur les bâtiments du fait du nombre et de la complexité des conditionnalités à modéliser, notamment :

- sélection du ou des pixels à plus fort aléa de glissement superficiel à partir du (des)quel(s), une coulée de débris est susceptible d'atteindre un bâtiment situé en contrebas ;
- prise en compte des obstacles : effet de masque d'un bâtiment situé à l'amont immédiat d'un ou plusieurs bâtiments ; présence d'une route, d'une tranchée constituant un piège à matériaux (cas de la voie ferrée à l'est de Tulle).

La sélection des pixels à plus fort aléa et des bâtiments théoriquement exposés aux coulées de débris est donc « manuelle ».

A la suite, un traitement pour classer l'aléa « coulée de débris sur les bâtiments » est réalisé à partir d'une **pondération des facteurs pente et pluie critique**. Ces deux critères sont retenus pour intégrer d'une part **l'aspect mécanique** (quel est le risque qu'un glissement superficiel évolue en coulées de débris ?) et d'autre part **l'aspect fréquence d'occurrence**, fonction directement de la durée de retour de la pluie critique générant un glissement. Ces deux facteurs sont considérés sur la zone initiale de glissement afin de classer le risque de formation d'une coulée de débris (figure n°35).

Pente	Coefficient
15-20°	1
20-25°	2
25-30°	4
30-45°	8
Pluie critique	Coefficient
≤100 ans	4
≤1000 ans	2
>1000 ans	1

Figure n°35 : coefficient de pondération du calcul de l'aléa coulée de débris

- Le facteur pente contrôlant étroitement le risque de formation d'une coulée de débris après glissement superficiel, on l'affecte des coefficients les plus importants. Pour les pentes : au-dessous de 20°, le risque est très faible sinon nul justifiant un coefficient multiplicateur de 0,5 qui tend donc à réduire l'aléa de coulée de débris.
- Pour la pluie critique, les seuils d'aléa de glissement sont repris : les pluies critiques > 1000ans sont considérées comme neutres dans la pondération

Le produit entre les valeurs des deux facteurs déterminant l'aléa de coulée de débris conduit à établir la grille de l'aléa (figure n°36).

Score	Aléa
0,5	faible
1	
2	
4	
8	moyen
16	
32	fort

Figure n°36 : coefficient de pondération du calcul de l'aléa coulée de débris

### 6.3.5.2 Cartographie de l'aléa coulée de débris sur les bâtiments

Le tableau suivant (figure n°37) décompte le nombre de parcelles construites par niveau d'aléa<sup>6</sup>, ce qui permet de mieux restituer la réalité de l'aléa qu'en décomptant le nombre de bâtiments potentiellement concernés par les coulées de débris car certaines parcelles comptent plusieurs bâtiments.

	Aléa fort	Aléa moyen	Aléa faible	Total
Nombre de parcelles construites	8	78	238	324

Figure n°37 : nombre de parcelles construites affectées par les coulées de débris par niveau d'aléa

### 6.3.5.3 Confrontation aux données de terrains

- **Aléa fort** : il ne concerne qu'un nombre très réduit de bâtiments répartis sur un secteur principal rue Lucien Sampeix (6 parcelles entre les n°47 et 55) et un secteur secondaire au nord immédiat de Cerice (2 parcelles).

1. **Rue Lucien Sampeix (site n°1, figure n°38)** : les conditions d'accès et d'observation n'ont pas permis d'analyser le versant en amont des bâtiments. La présence de formations superficielles argileuses est attestée au bas du versant au niveau du n° 55 mais leur continuité spatiale en amont est inconnue. Un talweg peu marqué est identifié au droit du n°47, ce qui constitue un facteur aggravant (concentration des écoulements et profondeur de sol plus importante). Globalement, le boisement dense du versant élève probablement la valeur de la pluie critique calculée par le modèle. De ce point de vue, une coupe à blanc du versant pourrait avoir des conséquences problématiques sur la stabilité du sol.

2. **Secteur de Cerice (site n°2, figure n°38)** : l'analyse du versant montre bien la présence de formations superficielles mais leur faciès est variable : agglomérat à galets et blocs et matrice sablo-argileuse en bas de versant et sans doute au sein du versant ; éboulis sans matrice en contrebas d'escarpements rocheux. De plus, le versant est actuellement boisé. Il apparaît ici que l'aléa effectif de glissements superficiels et donc de coulées de débris est sans doute plus faible que ne l'indique l'évaluation « théorique » de l'aléa.

- **Aléa moyen** : la plupart des sites en aléa moyen a fait l'objet d'une analyse de terrains : Bourbacoup, Louradour-Auzelou, Pra-Limouzy, La Fajardie, Quai de Rigny, Roussolle, La Garenne de Mulatet. Les 6 premiers sites font l'objet d'une analyse particulière.

<sup>6</sup> La liste des numéros de parcelles et leur niveau d'aléa est disponible en format informatique.

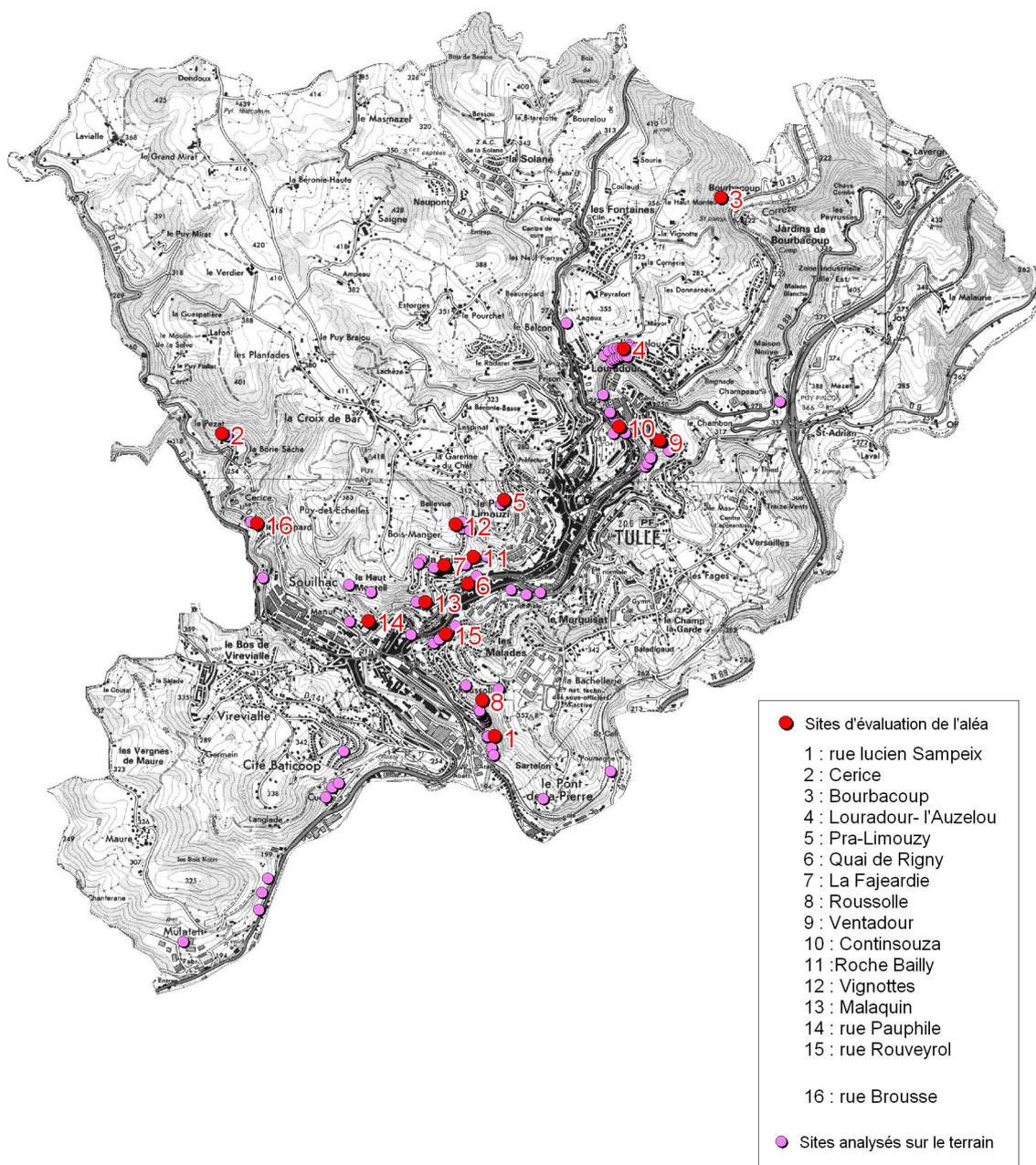


Figure n°38 : localisation des sites d'évaluation de l'aléa et des sites de contrôle terrain

**1. Bourbacoup (site n°3, figure n°38):** le versant est totalement boisé et ne montre aucun indice de glissements. L'aléa réel est sans doute plus modéré que celui modélisé. Un déboisement du versant modifierait cependant cette appréciation.

**2. Louradour – Auzelou (site n°4, figure n°38):** ce secteur est connu pour son activité historique (1960 et 2001). Actuellement, le degré élevé d'artificialisation des terrains (jardins aménagés en terrasse) réduit sans doute l'aléa pour les habitations du boulevard de l'Auzelou. L'aléa est peu modifié en revanche pour les habitations de la rue Jean Jacques Rousseau concernées par des

glissements pouvant se produire en contrebas de la rue de l'Ouradour ou au niveau du talus principal du glissement rocheux (cas de la coulée de débris de juillet 2001).

**3. Pra-Limouzy (site n°5, figure n°38):** les n°14 et 16 du boulevard Joseph Roux sont concernés par un aléa moyen de coulée de débris. Le versant est boisé ce qui réduit l'aléa potentiel mais inversement, le chemin de la Brousse traverse le versant et induit une perturbation potentielle de l'hydrologie du versant.. Par ailleurs, le versant est le siège d'un glissement rocheux qui génère des déformations sur les pavillons (n°16-18-20). Ce glissement modifie lui-même l'hydrologie du versant, dans le sens probable d'une forte perméabilité du massif rocheux dans la partie amont du glissement, c'est à dire en amont des pavillons. Globalement, la qualification en aléa moyen semble appropriée.

**4. Quai de Rigny (site n°6, figure n°38):** n°28 (école Sacré Cœur), 30, 32 et 32 bis.. L'analyse de terrain confirme la présence de formations superficielles argileuses mais les profondeurs de sol mesurées sont systématiquement inférieures à 1 m (0.45, 0.65, 0.70 et 0.85 m) ce qui réduit le volume potentiel d'un glissement et donc d'une coulée de débris. Par ailleurs, on n'observe pas d'indices d'instabilités passés sur un versant en prairies et jardins. Le contexte de pente, 25° environ, reste favorable à l'apparition de coulée. Globalement, le niveau d'aléa moyen attribué apparaît justifié.

**5. La Fajeardie (site n°7, figure n°38) :**

a) Les pavillons à l'est de l'avenue Gamblin (n°38 à 48) et l'impasse Gamblin sont dominés par un versant en prairie montrant des pentes de l'ordre de 20° qui s'accroissent en amont immédiat des pavillons. La partie central et amont du versant est considéré comme inconditionnellement stable par le modèle. L'aléa de coulées de débris est sans doute plus réduit que ne le restitue le traitement car les coulées potentielles après glissements en bas de versant seraient ainsi de faibles volumes. De plus, l'amont des pavillons est aménagé en terrasses-jardins ce qui va dans le sens de la stabilisation des terrains. Les sondages confirment la présence de formations superficielles argileuses. Globalement, l'attribution d'un aléa faible apparaît plus adapté.

b) Les pavillons de la partie ouest de l'avenue Gamblin (n°68 à 76) montrent sur l'amont versant soit des terrains rocheux, soit des formations superficielles de type éboulis rocheux avec un sol très faiblement argileux. Il est justifié ici de considérer que la qualification en aléa moyen est inadaptée, l'aléa de glissement et donc de coulée de débris pouvant être jugé comme inexistant.

**6. Roussolle (site n°8, figure n°38):**

a) Les n°7-9-11-13 impasse de la Bernardie, sont dominés par un versant boisé à forte pente. L'analyse de terrain montre la présence d'escarpements rocheux mais confirme la présence de formations superficielles argileuses. Le classement en aléa moyen semble donc justifié, l'aléa pouvant être aggravé par un déboisement du versant.

b) Sur le même versant, les n° 47 et 49 du boulevard Foch se situent en contrebas d'un talweg dont la partie aval est modélisé en aléa fort de glissement superficiel. Le boisement du versant réduit sans doute l'aléa réel, mais on peut considérer ici aussi que l'aléa moyen de coulées de débris est approprié.

- **Aléa faible** : les sites suivants ont fait l'objet d'une analyse de terrain : HLM de Ventadour, quai de Continsouza, collectifs de la Roche Bailly, Boulevard des Vignottes, avenue Malaquin, rue Pauphile (bas du versant du Colombier), rue Raymond Rouveyrol.

1. **HLM de Ventadour (site n°9, figure n°38)** : la partie occidentale du bâtiment est dominée par un versant terrassé en 3 niveaux de jardins dominant l'alvéole en arrière du bâtiment dégagé par recul du versant. La configuration de bas de versant est donc très comparable avec l'HLM des Fages (figure n°38). Les formations superficielles ont des épaisseurs mesurées de l'ordre de 0,50 m avec un maximum de 0,85 m. Le volume maximum d'un éventuel glissement et d'une coulée en dérivant est estimé de l'ordre de 150 à 300 m<sup>3</sup> ce qui suppose un glissement depuis le haut des jardins déstabilisant les murs en pierre des terrasses. Dans ce cadre, l'attribution d'un aléa faible de coulées de débris apparaît appropriée.



Figure n°38 : base du versant de l'HLM de Ventadour

2. **Quai de Continsouza (site n°10, figure n°38)** : les n°31 à 43B sont concernés. Les sondages réalisés sur le versant en amont du n°37 montrent des profondeurs de sols supérieures à 1 m. La pente du versant est de l'ordre de 35 à 40°. Des mouvements de terrains (éboulements / coulées de débris ?) ont touchés historiquement ce secteur (n°41 et 41B en 1958, 1984 et 1985).

Actuellement, le n°37 est particulièrement exposé du fait de l'absence de terrasses. Globalement, il ne semble pas que le ruissellement pluvial sur l'avenue de la Bastille qui surplombe le secteur puisse accroître les apports d'eau sur le versant du fait de la présence de trottoir et d'un réseau pluvial. Ce facteur a pu jouer antérieurement.

**Le classement en aléa faible n'est donc pas en cohérence avec les données historiques.** Cependant, la raideur du versant détermine un type de mouvement qui combine ou alterne éboulements en certains points et glissements superficiels-coulées de débris, sans que les parts respectives soient possible à délimiter. La prise en compte par ailleurs de l'aléa éboulement-chute de bloc permet d'encadrer cette dynamique particulière.

**3. Collectifs de la Roche Bailly (site n°11, figure n°38)** : le versant est en prairie. Les épaisseurs de sol sont de l'ordre de 0,50 m. La pente est assez modérée (22°) mais le ressaut inférieur s'incline à 30° avec des épaisseurs de sol plus fortes (0,80 m). La faible épaisseur du sol réduit le volume potentiel d'une coulée de débris dans un contexte d'aléa moyen de glissement. Le classement en aléa faible du secteur apparaît donc correct.

**4. N° 23 et 25 boulevard des Vignottes (site n°12, figure n°38)** : les sondages montrent la présence d'un sol argileux de profondeur variable sur les trois sondages : 0,40 m, 0,70 m et supérieure à 1,5 m. Cette dernière mesure se situe sur une rupture de pente à 30° dans un contexte de pente général à 22-23°. Cette rupture de pente représente sans doute le point névralgique du versant. Le classement en aléa faible apparaît de ce point de vue un peu réducteur. Cependant, la pluie de 2001 n'a pas déclenché d'instabilité sur le secteur selon les riverains.

**5. N°16 et 18 avenue Malaquin (site n°13, figure n°38)** : la pente moyenne du versant est de l'ordre de 25°. Les épaisseurs de sol sont de l'ordre de 0,50 m ce qui réduit le volume d'une éventuelle coulée qui est estimée à 50-100 m<sup>3</sup>. Le n°16 se situe à la marge de la zone sensible. L'attribution d'un aléa faible de coulée de débris est cohérente avec le contexte du site.

**6. N°8 à 18 rue Pauphile (site n°14, figure n°38)** : Une coulée s'est produite sur le versant en janvier 1994 atteignant le jardin du n°16. La forte pente du versant est à souligner (35° voire 40°). Le versant est enfriché (boisement clairsemé). On a vu précédemment que le modèle attribue une durée de retour de pluie critique très élevé (> 10 000 ans) et que la coulée de 1994 est induite par une séquence pluvieuse de faible intensité/longue durée dont la fréquence propre serait intéressante à calculer. Dans ce cadre, l'attribution d'un aléa de coulée de débris faible mineure sans doute la réalité. Un aléa moyen serait plus adapté.

**7. N°11 à 39 Rue Raymond Rouveyrol (site n°15, figure n°38)** : sur ce secteur les pentes en amont des pavillons atteignent ou dépassent 30° avec des escarpements rocheux (n°29-31). De plus, les jardins en amont des maisons (en contrebas du boulevard. Leclercq) sont souvent aménagés en terrasses. Dans ce cadre, le classement en aléa faible est adapté car on pourrait conclure ici à une absence d'aléa.

**8. N° 3 à 19 rue Jean Brousse (site n°16, figure n°38)** : la pente du versant est de l'ordre de 30°. L'épaisseur du sol est de l'ordre de 1 m. Le versant est occupé en partie haute par un boisement et en partie basse par des jardins. Le n°1 est

classé en aléa moyen de coulée de débris ce qui semble plus cohérent avec le contexte de pente que l'aléa faible attribué aux autres parcelles bâties.

#### **6.3.5.4 Conclusion sur la cartographie de l'aléa de coulée de débris**

Les données de terrains permettent de préciser les résultats issus des traitements semi-automatiques de la cartographie de l'aléa. Le contrôle « expert » ne permet pas toujours de trouver les arguments objectifs permettant de clarifier des incertitudes mais il est indispensable. Dans les cas de fortes incertitudes liées à de forts enjeux, le recours à une étude géotechnique approfondie devient nécessaire.

## **7. Gestion des risques**

La gestion des risques de mouvements de terrains comprend deux volets :

1. Le volet réglementaire (PLU, PCS, PPR).
2. Le volet prévention/protection qui se décline en deux sous-volets :
  - ⇒ Les mesures et travaux de protections ;
  - ⇒ Les dispositions d'alerte et de gestion de crise.

### **7.1 Volet réglementaire**

Les données de la présente étude peuvent être traduites dans les différents documents relatifs à l'urbanisme (PLU) et à la prévention des risques (PCS, PPR). En particulier, l'établissement d'un PPR mouvements de terrains apparaît justifié compte-tenu de l'importance des phénomènes historiques et de leurs conséquences matérielles et humaines. La réalisation d'un PPR nécessitera un complément d'étude afin de généraliser l'analyse de l'aléa de coulées de débris aux terrains non-bâties et pour systématiser les contrôles de terrains pouvant conduire à modifier la cartographie automatique de l'aléa glissements superficiels.

### **7.2 Volet protection**

#### **7.2.1 Mesures et travaux de protections**

⇒ **Eboulements-chutes de blocs**

La plupart des sites contraints par les éboulements-chutes de blocs ont fait l'objet de travaux de protection active (purge, clouage en paroi) et/ou passive (grillages, zones interdites à l'accès), à l'exception notable **du site des n°29 à 33 de l'avenue Ventadour** qui est actuellement sans protection malgré la présence de bâtiments en pied immédiat de paroi. Ce site doit faire l'objet d'une analyse particulière de diagnostic en paroi afin d'évaluer son degré de sensibilité et déterminer les mesures de protection nécessaires.

⇒ **Glissements rocheux**

L'évolution de la fissuration des bâtiments et secondairement de la voirie situés sur le **glissement de la Brousse à Pra-Limouzy** devrait être suivie, son accentuation pouvant à terme devenir problématique. La pose de jauges de déformation est donc recommandée, le choix de leur implantation et le suivi devant être faits par des spécialistes.

⇒ **Glissements superficiels et coulées de débris**

En l'état, la protection des sites soumis à ces aléas et en particulier à l'aléa coulée de débris ne justifie pas de mesures de protection particulières. Du point de vue des mesures préventives, la gestion des coupes forestières sur les versants boisés dominant des sites sensibles doit faire l'objet d'une attention particulière afin de ne pas perturber l'hydrologie des versants. L'interdiction de coupes à blanc est une mesure de prévention importante mais dont la mise en œuvre peut être délicate en fonction du statut de propriété. Cette mesure devrait être intégrée dans un éventuel PPR. Dans le même ordre d'idée, les travaux de voiries (création / modification) doivent prendre en compte la nécessité de bien gérer les écoulements en évitant leur rejet en contrebas sur des terrains sensibles aux glissements superficiels.

## 7.2.2 Les modalités d'alerte et de gestion de crise

Celles-ci concernent les aléas de glissements superficiels et coulées de débris. Préalablement ou parallèlement, à l'établissement d'un protocole d'alerte et de gestion de crise, **une information publique** restituant précisément la nature et l'intensité des risques doit être diffusée avec pour objectif principal de ne pas être « catastrophiste ».

En cas d'alerte, un protocole de prévention des risques doit être mis au point pouvant intégrer plusieurs mesures (avis aux habitants des sites sensibles, évacuation partielle (interdiction d'utiliser les pièces situées en face amont-versant) ou totale des bâtiments exposés aux coulées de débris, déclinées sélectivement ou non selon le degré d'aléa des sites sensibles.

Les modalités d'alerte concernent deux types de situation selon le contexte d'intensité/durée des pluies génératrices :

1. Les pluies génératrices de forte intensité/faible durée : type octobre 1960 et juillet 2001.

Pour les pluies de fortes intensités, les modalités d'alerte doivent s'appuyer sur les prévisions de Météo-France de fortes précipitations. Durant l'épisode pluvieux, le suivi du cumul de pluie en temps réel est possible du fait de l'existence d'un pluviographe Météo-France à Tulle. Des seuils de cumul devront être définis pour déterminer des phases de pré-alerte et d'alerte auxquelles seront associées des dispositions particulières (vigilance des services de protection civile, alerte des habitants, évacuation...).

2. Les pluies génératrices de faible intensité/longue durée : type janvier 1994 entre autres.

Pour ce type de situation, des seuils de cumul/durée devront être fixés soit en utilisant une formulation empirique telle que celle de Corominas et Moya (1999) dont on a vu qu'elle explique bien l'occurrence de la coulée de janvier 1994 au Colombier ou, préférentiellement, en utilisant les modèles de Borga ou de Baum qui permettent d'analyser l'incidence de pluies sur des pas de temps variables. L'intérêt de la modélisation est bien évidemment de pouvoir parvenir à un zonage de l'aléa.

## 8. Conclusion générale

Le territoire de Tulle a été affecté dans un passé récent par des épisodes pluvieux intenses. Tant en octobre 1960 qu'en juillet 2001, des glissements superficiels et des coulées de débris en dérivant ont révélé la sensibilité de la commune à ce type de phénomène en raison de l'environnement topographique (versants à forte pente) et de l'urbanisation.

L'étude des mouvements de terrains sur la commune de Tulle s'est donc concentrée sur l'analyse de l'aléa glissement superficiel – coulée de débris, sachant que ce type de phénomène présente la particularité de laisser peu d'indices morphologiques de surface de son activité passée. De plus, ces phénomènes sont fortement corrélés avec le régime pluvieux (forte affinité avec les pluies de forte intensité / faible durée, mais également avec des séquences pluvieuses de faible intensité / longue durée).

Ceci impose de développer une méthodologie d'analyse différente de celle habituellement développée pour l'étude des mouvements de terrains puisqu'il s'agit de déterminer les zones potentiellement sensibles. Les pluies étant le facteur de déclenchement des phénomènes, la détermination de l'aléa peut s'appuyer sur une quantification de la probabilité d'occurrence des phénomènes en fonction de la durée de retour des pluies critiques pour la stabilité des terrains.

Dans un contexte de forte urbanisation qui modifie considérablement les conditions hydrologiques des versants (surfaces imperméabilisées, voiries qui redistribuent en concentrant/réduisant les écoulements de surface...), la mise en œuvre d'un modèle informatique de détermination permet d'obtenir un zonage satisfaisant des sites sensibles aux glissements superficiels, malgré l'existence de cas –limites (site des Fages). L'expertise de terrain permet ensuite d'évaluer les résultats de la cartographie automatique de l'aléa qui se révèle globalement satisfaisante.

Pour l'aléa de coulées de débris, son évaluation sur les seuls bâtiments est **pertinente en terme de gestion des risques** (quels sont les sites les plus exposés ?) mais **insuffisante dans le cadre d'un PPR** qui nécessite de disposer d'une vision complète (terrains bâtis et non-bâtis) des problèmes en terme de règlement d'urbanisme. Ainsi, l'importance des enjeux nécessitera un travail plus exhaustif pour l'établissement d'un PPR, en particulier sur le terrain pour vérifier les résultats de la modélisation et des traitements cartographiques en dérivant pour la définition de l'aléa coulées de débris.

Pour les autres phénomènes, l'aléa éboulements-chutes de blocs est bien connu localement ce qui ne signifie pas qu'il est parfaitement maîtrisé. Enfin, deux glissements de terrains profonds au sein du massif rocheux ont été repérés à Pra-Limouzy et à Louradour-Auzelou. A Pra-Limouzy, les déformations sur le bâti et sur la voirie indiquent que le glissement est sujet à des réactivations périodiques au moins dans sa partie supérieure.

Du point de vue de la gestion des risques, l'engagement d'un Plan de Prévention des Risques est justifié au regard de l'importance des événements historiques et de leurs conséquences. Parallèlement, des interventions 1) de protections active/passive sont ponctuellement nécessaires (éboulement/chute de blocs sur l'avenue Ventadour), 2) de surveillance des déformations sur le bâti (glissement de la Brousse à Pra-Limouzy) sont recommandées.

Pour la gestion des risques de glissements superficiels-coulées de débris, la mise au point d'un protocole d'alerte est nécessaire ainsi qu'une information précise et pédagogique des habitants des zones sensibles.

## 9. Références documentaires

### 9.1 Publications scientifiques

**Baum Rex L., Savage William Z., and Godt Jonathan W. (2002) :**

A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis

<http://pubs.usgs.gov/of/2002/ofr-02-424/>

**Bell F.G., Maud R.R. (1999) :**

Landslides associated with the colluvial soils overlying the Natal Group in the greater Durban region of Natal, South Africa ; Environmental Geology ; 39 ; 1029-1038

**Borga M. , Dalla Fontana G. , Da Ros D. , Marchi L. (1998)**

Shallow landslide hazard assessment using a physically based model and digital elevation data  
Environmental geology : (Berlin). [ Environ. geol. : (Berl.). ] , 35 , 2-3 , 81 - 88

**Borga M. , Tonelli F. , Dalla Fontana G., Cazorzi F. (2005)**

Evaluating the influence of forest roads on shallow landsliding

Ecological modelling , 187 , 1 , 85 - 98

**Brown G.W., Krygier J.T. (1971):**

Clear-cut logging and sediment production in the Oregon Coast Range ;

Wat.Resour.Res. ; 7, 1189-1198.

**Burroughs E.R., Thomas B.R. (1977) :**

Declining root strength in Douglas-Fir after felling as a factor in slope stability ;

Res. Pap. INT-190 ; US Dep. of Agri. ; 27 p

**Caine N. (1980) :**

The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows ;

Geografiska Annaler – 62 A – 23-27.

**Chowdhury R., Flentje P. (2002) :**

Uncertainties in rainfall-induced landslide hazard ;

Quarterly Jour. of Engineering Geol. and Hydrogeology ; 34 ; 61-70

**Corominas J., Moya J. (1999) :**

Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin, Eastern Pyrenees, Spain ; Geomorphology ; 30 ; 79-93

**Dunne T. (1991) :**

Stochastic aspects of the relations between climate, hydrology and landform evolution ;

Trans. Jp. Geomorph. Union ; 12 ; 1-24

**Ekanayake J.C., Philips C.J. (1999) :**

A model for determining thresholds for initiation of shallow landslides under near-saturated conditions in the East Coast region, New Zealand ; Journal of Hydrology ; 38 ; 1-28

**Frederiksen R.L. (1970) :**

Erosion and sedimentation following road construction and timber harvest on unstable soils in three small western Oregon watersheds ; Res. Pap. PNW-104 ; US Dep. of Agri. ; 15 p.

**Greswell S., Heller D., Swanston D.N.(1979) :**

Mass movement response to forests management in the central Oregon Coast Ranges ;

Res. Pap. PNW-84 ; US Dep. of Agri. ; 26 p.

**Iverson R.M., Reid M.E., LaHusen R.G. (1997) :**

Debris flow mobilization from landslides ;

Annu.Rev. Earth Planet. Sci., 25 , 85-138.

**Iverson R.M. (2000) :**

Landslide triggering by rain infiltration ;

Water Resources Research ; 36 ; 7 ; 1897-1910

**Guidicini G. Iwasa OY (1977) :**

Tentative correlation between rainfall and landslides in a humid, tropical environment ;  
Bull. Int. Assoc. Eng. Geol. ; 16 ; 13-18

**Malet J.P. ; Remaître A. ; Maquaire O. (2004) :**

Runout modelling and extension of the threatened area associated to muddy debris flows ;  
Géomorphologie, 3, 223-237.

**Martin K., Skauset A., Pyles M.R. (1996) :**

Forest management of landslide prone sites : the effectiveness of headwall leave areas ;  
part.II ; COPE Report ; 9 ; 8-12

**Mersereau R.C. , Dyrness C.T. (1972) :**

Accelerated mass wasting after logging and slash burning in Western Oregon ;  
J. Soil Wat. Conserv. ; 27 ; 112-114.

**Montgomery D.R., Sullivan K., Greenberg M. (1998) :**

Regional test for shallow landsliding ; Hydrological Process - 12, 943-955.

**Montgomery D.R., Dietrich W.E., Heffner J.T. (2002) :**

Piezometric response in shallow bedrock at CB1 : implications for runoff generation and landsliding ;  
Water Resources Research ; 38 ; 12 ; 1274-1287

**Moser M., Hohensinn F. (1983) :**

Geotechnical aspects of soil slips in alpine regions ; Eng. Geol. ; 19 ; 185-211

**Pollini G., Ceriani M., Lauzi S., Padovan N., Crosta G. (1991) :**

Rainfall and soil slipping in Valtellina ; Bell DH. (ed.)  
Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides ; Christchurch ; 183-188

**Sidle R.C. (1992) :**

A theoretical model of the effects of timber harvesting on slope stability ;  
Wat. Resour. Res. ; 28 ; 1897-1910.

**Skaugset A., Froehlich H., Lautz K. (1993) :**

The effectiveness of headwall leave areas ; COPE Report ; 6 ; 3-6

**Soutade G. (1978) :**

Modèle et dynamique actuelle des versants supra-forestiers des Pyrénées-Orientales.  
Thèse, Bordeaux II

**Swanson F.J., Dyrness C.T. (1975) :**

Impact of clear-cutting and road construction of soil erosion by landslides in the western  
Cascade Range, Oregon ; Geology ; 3 ; 393-396.

**Swanston D.N., Swanson F.J. (1976) :**

Timber harvesting, mass erosion, and steepland forest geomorphology in the Pacific Northwest ;  
in Coates D.R. (ed.), Geomorphology and Engineering ; 199-221.

**Terlien M.T.J. (1997) :**

The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds ;  
Environmental Geology ; 35 ; 124-130

**Varnes D.J. (1978) :**

Slope movement Types and processes ; in Schuster (ed.) ; Landslides analysis and control ;  
Chap.2 ; 11-33

**Wilson R.C., Wieczorek G.F. (1995) :**

Rainfall thresholds for the initiation of debris flows at la Honda, California ;  
Environ Eng. Geosc. ; 1 ; 11-27

**Ziemer R.R., Swanston D.N. (1977) :**

Root strength changes after logging in southeast Alaska ;  
Research Note PNW-306, US Forests Service, Portland.

## **9.2 Etudes techniques non publiées**

- Rapport d'étude et Diagnostic des mouvements de terrain suite aux précipitations de début Juillet 2001-Alpha BTP Limoges- Ref (L01.13.090) .
- Confortement du talus en amont du C.A.T. Z.I. de Mulatet 19 TULLE – Alpha BTP Limoges – Réf : L05.11.027.A – Ville de Tulle.
- Vérification de la stabilité d'un talus – Zone de Mulatet – 19 TULLE – Alpha BTP Limoges – Réf : L07.11.033.A – SARL Pouquet.
- Renforcement de l'accotement Chemin de Puy Reynac TULLE – GINGER – Réf. SLG2-7-208 – Ville de Tulle.

## 10. Annexe 1 : Récapitulatif des phénomènes historiques

Année	Localisation	Phénomène	Source
Non daté	L'Auzelou - Louradour	Glissement	Géodes
Non daté	Chemin de la Brousse (Pra-Limouzy)	Glissement	Géodes
Non daté	Boulevard Joseph Roux (Pra Limouzy)	Glissement	DDE 19 / Géodes
1873	Faubourg entre Route Tulle-Corrèze-RN Limoges	Eboulement	BD MVT BRGM
1958	Le Pezat (Carrière Colas)	Eboulement	BD MVT BRGM
1958	Quai Favard	Glissement	BD MVT BRGM
1959	Le Coupart	Glissement	BD MVT BRGM
1960	Boulevard de l'Auzelou	Coulée de débris	Géodes
1960	Boulevard Joseph Roux (Pra Limouzy)	Glissement	DDE 19
1962	Rue Guynemer	Glissement	DDE 19
1966	Avenue de la Bastille (Puy St Clair)	Eboulement	DDE 19
1970	Avenue Malaquin (Falaise rocheuse)	Eboulement	DDE 19
1971	Le Pezat (Carrière Colas)	Eboulement	BD MVT BRGM
1975	Cueille HLM	Glissement	BD MVT BRGM
1984	Chemin de Gamot	Glissement	DDE 19
1986	Quai Continsouza (ex quai Favard)	Eboulement	Géodes
1988	Champeau	Glissement	BD MVT BRGM
1994	Avenue Maxime Deloche	Glissement	BD MVT BRGM
1994	Rue Souham (Résidence HLM Pièce-Verdier)	Glissement	BD MVT BRGM
2001	Avenue Raymond Poincaré	Eboulement	BD MVT BRGM
2001	Avenue Raymond Poincaré-Aragon	Glissement	BD MVT BRGM
2001	Quartier Louradour	Glissement	BD MVT BRGM
2001	HLM des Fages (Actuel Conseil Général)	Coulée de débris	BD MVT BRGM
2001	Beauregard (Jardin ouvriers du Balcon-Beauregard)	Glissement	BD MVT BRGM
2001	Secteur de l'Arpaillant	Glissement	BD MVT BRGM
2001	RD9	Glissement	BD MVT BRGM
2001	Saint Adrian	Glissement	BD MVT BRGM
2001	Pont Moulin de Laval	Glissement	BD MVT BRGM
2001	Official (RD39)	Glissement	BD MVT BRGM
2001	Chemin rural entre La Vialle et le Grand Murat	Glissement	BD MVT BRGM
2001	La Borie Sèche	Glissement	BD MVT BRGM
2001	Centre aéré Chambon	Glissement	BD MVT BRGM
2001	Rue Jean Jacques Rousseau	Coulée de débris	Géodes
2002	Boulevard J.Audiau (Falaise rocheuse)	Eboulement	BD MVT BRGM
2004	ZI de Mulatet (Réservoir d'eau)	Glissement	BD MVT BRGM
2004	Rue Docteur Dufayet (Falaise rocheuse)	Eboulement	BD MVT BRGM
2004	Anciens HLM de la Gibrande	Glissement	BD MVT BRGM
2005	Rue Anne Vialle (Falaise rocheuse)	Eboulement	BD MVT BRGM
2005	Avenue Malaquin (Falaise rocheuse)	Eboulement	BD MVT BRGM

## 11. Annexe 2 : Méthodologie d'étude des glissements superficiels et des coulées de débris

### 11.1 Détermination des seuils pluviométriques d'instabilité

La détermination de seuils pluviométriques à partir desquels apparaissent les mouvements superficiels a fait l'objet de nombreuses recherches. Des avancées significatives pour l'approche de ce problème ont été obtenues depuis une dizaine d'années par la mise en œuvre de modèles utilisant un Système d'Information Géographique (SIG). Deux types de recherches ont été conduites :

- l'établissement de relation empirique entre pluviométrie et instabilité à partir de la compilation de données pluviométriques d'évènements associés à des mouvements de terrains superficiels. Parmi d'autres, la relation de Caine (1980) est la plus connue (voir ci-dessous).
- La construction de modèles combinant un modèle hydrologique et un modèle mécanique de stabilité des terrains. Cette dernière approche pose toujours le problème de l'acquisition des données adéquates à un site donné ce qui complique et alourdit en conséquence un processus de généralisation.

La variation dans le temps et dans l'espace de la teneur en eau des terrains constitue la principale inconnue. Elle explique la variabilité des seuils pluviométriques d'instabilité des terrains. Les recherches les plus récentes s'attachent en particulier à résoudre la question des **pluies antécédentes** réglant le seuil de déclenchement lors de la **pluie génératrice** (épisode pluvieux directement associé dans le temps à l'instabilité).

#### 11.1.1 Relations pluie antécédente – pluie génératrice

Pour situer l'incidence des pluies antécédentes dans la valeur du seuil d'instabilité, Corominas et Moya (1999) montrent que les glissements superficiels étudiés dans les Pyrénées sud-catalanes se déclenchent à partir de pluies génératrices supérieures à 190 mm/24h en l'absence de pluies antécédentes significatives. Quand celles-ci sont importantes, le seuil de déclenchement de la pluie génératrice s'abaisse fortement, par exemple : 68 mm/24h pour 219 mm/10 jours de pluies antécédentes ; 106 mm/24h pour 256 mm/6 semaines de pluies antécédentes.

**La durée des pluies antécédentes à prendre en compte** constitue donc **l'indétermination la plus problématique**. Elle est fonction de la capacité de drainage du massif et peut donc être fortement évolutive d'un site à l'autre en fonction des propriétés hydrauliques des terrains. Théoriquement, cette inconnue peut être levée sur un site équipé en piézomètres et en capteurs de pressions interstitielles restituant la profondeur et le degré de saturation des terrains superficiels. Mais cette approche déterministe n'est pas généralisable à grande échelle et on doit donc procéder différemment pour ce faire.

Selon Chowdhury et Flentje (2002), la durée maximale à prendre en compte est de l'ordre de 120 jours sur leur région d'étude. Cette durée est déduite par suivis inclinométriques de mouvements superficiels.

Selon Terlien (1998), la durée de la pluie antécédente à prendre en compte est reliée à la profondeur de la surface de rupture. Cette relation dépend du type de processus hydrologique conduisant à la saturation des terrains. Terlien distingue ainsi deux grands types de phénomènes :

- **Des pluies génératrices faibles** associées à des pluies antécédentes « longues », déterminent des mouvements plus profonds ( $> 2$  m). La succession de pluies antécédentes permet une **saturation progressive des terrains depuis la base vers le sommet**. La lithostratigraphie des terrains et leurs propriétés hydrauliques sont primordiales pour expliquer la localisation de la surface de rupture. Une succession de niveaux à perméabilité différente favorisera la constitution de nappes perchées et des vitesses de saturation variables d'un niveau à l'autre. La surface de rupture se localisera au contact d'un niveau de moindre perméabilité. Dans le cas d'un massif superficiel homogène, la saturation des terrains pourra se faire au contact du substrat rocheux qui constituera la zone de rupture.
- A l'inverse, **de fortes pluies génératrices** combinées avec peu ou pas de pluies antécédentes, favoriseront des mouvements peu profonds ( $< 2$  m). Dans ce cas, le processus de saturation se fait par **percolation depuis la surface**. La profondeur de rupture est peu dépendante des variations lithologiques du massif superficiel mais, plus directement, de ces propriétés mécaniques et de la pente du versant.

Iverson (2000) distingue également les glissements de faibles profondeurs et les glissements affectant des terrains « plus épais ».

- Pour les glissements de faibles profondeurs affectant des terrains à forte transmissivité hydraulique, des précipitations intenses favorisent une croissance rapide de la pression hydrostatique qui est très élevée à la rupture. Dans ce cas, le risque d'une évolution catastrophique du glissement en coulée de débris est nettement majoré.
- Pour les glissements plus épais dans des terrains à faible transmissivité, la pression hydrostatique s'accroît lentement et sa valeur est faible à la rupture qui se produit graduellement en réponse à des changements mineurs du rapport entre les forces motrices et les forces résistantes : le glissement évoluera donc lentement.

### 11.1.2 Les relations empiriques pluie-instabilité

Plusieurs relations empiriques ont été établies ces dernières années (Caine, 1980 ; Moser et Hohensinn, 1983 ; Pollini et *al.*, 1991 ; Wilson et Wiczorek, 1995 ; Corominas et Moya, 1999 ; Bell et Maud, 2000). Ces relations donnent des résultats variables du fait que la pluviométrie associée à un événement instable dépasse plus ou moins la valeur effective de déclenchement de l'instabilité.

**Caine (1980)** a proposé une relation permettant de situer le seuil pluviométrique d'instabilité pour des durées de précipitation comprises entre 10 mn et 10 jours :

$$H = 14.82 D^{-0.39}$$

(H : hauteur de pluie en mm et D durée de la pluie en heures)

Deux observations doivent être faites :

- Les données pluviométriques utilisées ne sont pas directement reliées au déclenchement effectif des mouvements de terrains. **Elles ne représentent donc pas les valeurs-seuils d'instabilité des terrains.**
- Certaines valeurs excèdent fortement le seuil de déclenchement ; d'autres sont manifestement très faibles et reflètent des conditions initiales de forte teneur en eau des terrains ou, comme l'évoque Caine, l'apport d'eau de fusion nivale.

Il en résulte une très forte dispersion des valeurs. Le graphique ci-dessous reprend les valeurs de Caine comprise entre 1h et 24 h, complétées par des données collectées par nos soins. Bien que les durées prises en compte soient fortement réduites par rapport à l'ajustement de Caine, la dispersion des valeurs et la faiblesse du coefficient de corrélation demeure.

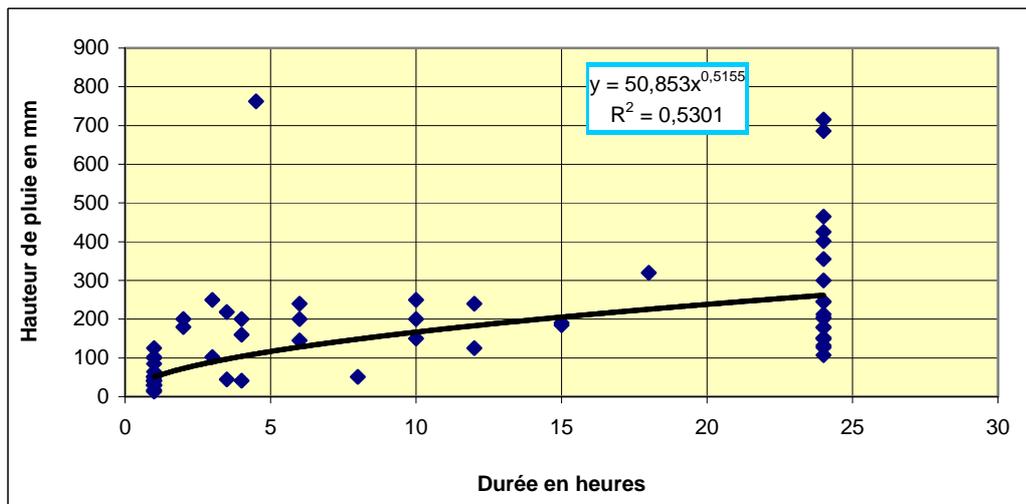


Figure n°4 : répartition des valeurs de pluies critiques pour différentes durées selon la relation de Caine

Ses limites étant posées, la relation de Caine présente l'intérêt de proposer des valeurs-seuils « relativement » basses, permettant d'intégrer une marge de sécurité indispensable dans le cadre d'une analyse de risque<sup>7</sup>. Cette marge de sécurité permet, par ailleurs, de prendre en compte des conditions initiales défavorables du point de vue de la teneur en eau du fait en particulier de la succession d'événements pluvieux antérieurs à l'événement déclencheur ou de la fonte d'un manteau neigeux.

<sup>7</sup> « ...the estimate threshold may be applied to the quantitative evaluation of natural hazards associated with shallow landslides and debris flows...this would give a reasonable margin of safety...» Caine (1980), p.26.

**Corominas et Moya (1999)** propose également une relation empirique pour estimer le cumul de pluie nécessaire au déclenchement, intégrant les pluies antécédentes et la pluie génératrice :

$$CP = 32 D + 133$$

CP, cumul de pluie en mm ; D, durée en semaine.

Cette relation s'applique au moins pour des durées de l'ordre de 6 semaines. Elle a été testée avec succès pour expliquer le déclenchement du glissement-coulée survenu au-dessus de Laruns (vallée d'Ossau, 64) le 4 février 2003. Les cumuls de pluie sur 7 et 14 jours précédents sont analogues à ceux proposés par la relation.

A noter que pour une pluie antécédente d'une semaine, le seuil donné par la relation de Corominas et Moya est 2 fois inférieur à celui donné par la relation de Caine (165 mm / 337 mm). Cette différence s'explique par le fait que la relation de Corominas et Moya concerne une région d'étude homogène du point de vue climatique et à un degré moindre géologique à la différence de la relation de Caine obtenue à partir d'une compilation de données hétérogènes de ce point de vue.

**Bell et Maud (2000)** propose une approche différente des précédentes qui reprend celle développée par Guidicini et Iwaza (1977). L'occurrence de glissements superficiels dépend :

- D'un coefficient cyclique  $C_c = CPR / MAP$  avec CPR, pluie antécédente et MAP, pluviométrie moyenne annuelle ;
- D'un coefficient d'événement  $C_e = PRE / MAP$  avec PRE, pluie génératrice.
- $C_c + C_e = C_f$  coefficient final

En considérant le coefficient d'événement  $C_c$  (pluie génératrice), les auteurs mettent en évidence les seuils suivants :

- ⇒ Un premier niveau d'instabilité, modérée, apparaît pour des pluies génératrices comprises entre 12 – 16 % de la MAP (pluviométrie moyenne annuelle).
- ⇒ Entre 16 – 20 % de la MAP, le nombre de cas de glissements s'accroît.
- ⇒ Au-delà de 20 % de la MAP, les déclenchements de glissements se multiplient fortement et des glissements de grande ampleur sont observés.

### 11.1.3 Les modèles numériques d'analyse de stabilité

Les modèles de stabilité visant à déterminer un seuil de déclenchement pluviométrique associent un modèle hydrologique et un modèle mécanique de stabilité des terrains, notamment : Montgomery et Dietrich (1994) ; Ekanayake et Phillips (1999) ; Borga *et al.*, 2002 ; Baum *et al.*, 2002 et v.2005 appliquant la théorisation d'Iverson (2000).

Le modèle développé par **Montgomery et al** présente l'intérêt d'être assez facilement mis en œuvre. De plus, le modèle a fait l'objet d'un test à l'échelle régionale permettant de situer valablement sa qualité. Ce modèle étant utilisé pour la présente étude, on en présente

les fondements théoriques principaux et ses limites ainsi que l'apport potentiel des autres modèles cités.

L'hypothèse centrale du modèle est que les **facteurs topographiques**, et en premier lieu la pente, constituent le principal facteur de déclenchement. A la suite, l'acquisition des données topographiques sur un territoire important (à l'échelle d'un département p.ex.) peut se faire automatiquement à l'aide de MNT et sous SIG. La contrepartie évidente est que les facteurs non-topographiques doivent être considérés suffisamment invariants pour faire l'hypothèse de valeurs communes d'un site à l'autre.

On présente successivement la composante hydrologique et la composante mécanique du modèle. Pour le volet hydrologique, les caractéristiques du modèle sont confrontées à celles des modèles plus complexes de Borga et *al.* (2002) et Baum et *al.* (2002-2005). Pour le volet mécanique, les modèles présentés ici utilisent tous la théorie du versant infiniment long.

### 11.1.3.1 Modèle hydrologique

**Le modèle hydrologique** est basé sur l'hypothèse d'un **état stationnaire ou invariant** des conditions hydrologiques sur un versant évaluées en considérant que l'aire spécifique de drainage contrôle la valeur de l'écoulement de subsurface en tous points (O'Loughlin, 1986). Cette hypothèse nécessite théoriquement l'équilibre en chaque point des conditions d'écoulement de sub-surface ce qui est une simplification de la réalité. Ces conditions étant rarement atteintes en particulier durant les périodes sèches, une **modélisation dynamique** est plus appropriée mais également plus complexe.

**Une approche quasi-dynamique** évaluant le temps de l'écoulement en sub-surface en fonction de la pente a été développée par Barling et *al.* (1994) et reprise par Borga et *al.* (2002). Cette approche quasi-dynamique permet d'évaluer l'instabilité des terrains pour des durées de pluie variables. On peut ainsi chercher à cerner quel est la durée/intensité la plus défavorable en fonction des caractéristiques hydrauliques des terrains.

Différemment, Iverson (2000) considère, à la suite de plusieurs chercheurs, comme fondamentale **l'incidence des apports transitoires de l'infiltration de l'eau de pluie** en surface du versant. Ces apports déterminent les variations de pression hydrostatiques en sub-surface en réponse à des pluies d'intensité/durée variables dans le temps et dans l'espace. L'intérêt majeur de l'approche est de pouvoir modéliser l'incidence de pluies d'intensité-durée (I/D) variables en prenant en compte les caractéristiques de profondeur et de conductivité des terrains afin de déterminer le couple I/D critique.

Le modèle numérique développé par Baum et *al.* (2002-2005) sur les travaux d'Iverson (2000), permet d'améliorer très sensiblement le modèle hydrologique du versant en prenant en compte les surfaces imperméabilisées et les apports d'eau dérivés par les voiries. Ce code de calcul constitue évidemment un progrès majeur pour une analyse en milieu urbain. Mais il nécessite de disposer de données topographiques de haute précision permettant de

restituer fidèlement la micro-topographie du réseau routier<sup>8</sup>. Ce modèle est en cours de test et de validation.

Pour Montgomery et al. (2002), les facteurs de perturbation des conditions d'écoulement de sub-surface, tels que l'existence de « tubes » d'écoulement qui concentrent le drainage et plus encore **les circulations d'eau dans les discontinuités du substrat rocheux** (fracturation, stratification...), réduisent fortement l'intérêt des modèles hydrologiques dynamiques pour la prévision des glissements superficiels. Cependant, Borga et al. (2002) montrent que les résultats obtenus par un modèle hydrologique utilisant un index quasi-dynamique sont significativement meilleurs que ceux obtenus par un modèle basé sur une approche statique.

En ce qui concerne la théorisation d'Iverson (2000), Montgomery et al. (2002) constate que son application sur leur site expérimental permet de déterminer de manière satisfaisante les couples I/D de pluie générant des glissements superficiels. Mais la formulation d'Iverson est très sensible à la valeur des paramètres ce qui nécessite des mesures initiales dans des contextes sédimentologiques homogènes permettant ainsi d'utiliser toutes les finesses du modèle. Cette contrainte réduit la capacité de travailler à grande échelle, ce qui est la caractéristique fondamentale du modèle de Montgomery et Dietrich.

A la suite, pour l'étude des mouvements de terrain sur la commune de Tulle, l'importance des perturbations de l'hydrologie de surface et de sub-surface du fait de l'urbanisation nous ont conduit à privilégier une approche centrée sur le facteur topographique. Il est en effet inutile de mettre en œuvre un modèle théoriquement plus précis sans un affinage important des valeurs le paramétrant.

L'utilisation d'un modèle hydrologique plus sophistiqué (Borga et plus encore Baum) apparaît justifiée sur une zone restreinte sur laquelle des mesures in situ et en laboratoire permettent de bien calibrer les variables fondamentales de calcul (conductivité hydraulique, cohésion, angle de frottement, épaisseur du sol).

De ce point de vue, un test à grande échelle n'a pas été conduit pour les modèles de Borga et de Baum. Inversement, Montgomery et al (1998) ont réalisé un test à l'échelle régionale (3000 km<sup>2</sup>) d'un modèle statique portant sur 3224 mouvements de terrains. Ceci permet de certifier la validité et les limites du modèle.

**Le test de validité du modèle** montre qu'il explique 76 % des 3224 glissements recensés. Parmi les 24 % de cas aberrants pour lesquels les terrains sont théoriquement stables, la moitié est située sur le réseau routier dont l'incidence péjorative sur la stabilité a déjà été évoquée. Le restant s'explique, d'une part, du fait de conditions géologiques très particulières, pour lesquelles les valeurs de cohésion et de frottement interne « standards » ne sont pas adéquates, d'autre part, du fait d'un niveau de précision insuffisant du MNT utilisé. Plus accessoirement, certains mouvements superficiels sont inclus dans des mouvements de terrains de grande ampleur, ce qui implique des propriétés hydrogéotechniques anormales.

---

<sup>8</sup> Actuellement, la technologie de levés aériens LIDAR permet de constituer un Modèle Numérique de Terrain au pas de 0,50 m avec une précision altimétrique de +/-15 cm. Le coût est en rapport avec la précision ... mais peut être justifié au regard d'enjeux élevés dans une zone urbaine telle que Tulle.

### 11.1.3.2 Modèle mécanique

Le modèle mécanique utilise la théorie de la pente infinie qui s'applique bien à l'analyse de la stabilité des formations superficielles de faible épaisseur ( $\approx 1-5$  m) pour lesquelles les conditions de stabilité en pied du versant sont indifférentes (l'épaisseur du sol est petite par rapport à la longueur du versant). La théorie de la pente infinie repose sur plusieurs simplifications. En particulier, il s'agit d'un modèle de rupture unidimensionnel qui fait l'hypothèse que la rupture se produit sur un plan et néglige les forces latérales. L'équation décrivant les conditions de la rupture sur un versant infini oppose la contrainte gravitaire aux forces résistantes de friction déterminées par le critère de Coulomb.

### 11.1.3.3 Seuil pluviométrique critique

Par réarrangement de l'équation déterminant le facteur de sécurité, Montgomery et Dietrich (1994) introduise le concept de **seuil pluviométrique critique** qui, pour l'étude des aléas de glissements superficiels, présente l'intérêt de **relier directement le déclenchement théorique d'un glissement à une valeur pluviométrique**. De là, il est aisé d'en déduire une durée de retour.

Pour le modèle mis en œuvre ici, le seuil pluviométrique critique correspond au cumul de pluie sur une durée de 24 h. La prise en compte de la durée de 24 h est intéressante car elle est compatible avec la totalité des postes pluviométriques de Météo-France, l'équipement systématique des stations en pluviographe permettant une mesure à divers pas de temps étant récent ou en cours et les données pluviographiques les plus anciennes ne concernant généralement une seule station par département. A la suite, les chroniques de pluies sur 24 h étant plus anciennes et couvrant bien le territoire, elles permettent d'établir des statistiques plus fiables pour évaluer les valeurs de pluies pour des fréquences rares (100 ans et plus).

Le seuil pluviométrique critique  $Q_c$  s'obtient par :

$$Q_c = T \sin\theta / (a/b) [C'/\rho_w g z \cos^2\theta \tan\phi + \rho_s/\rho_w (1-(\tan\theta/\tan\phi))]$$

Avec :  $\theta$  pente (degré) ; a aire drainée ( $m^2$ ) ; b longueur de l'aire drainée (m) ; C' cohésion du sol ( $kN/m^2$ ) ;  $\phi$  angle de frottement interne (degré) ;  $\rho_s$  poids volumique des terrains ( $kg/m^3$ ) ;  $\rho_w$  poids volumique de l'eau ( $kg/m^3$ ).

La principale critique que l'on peut faire à ce modèle est qu'il ne prend pas en compte l'état de saturation des terrains et donc **l'incidence des pluies antécédentes**.

**Ce modèle s'applique donc aux mouvements de terrains liés à des pluies génératrices intenses**, c'est à dire aux glissements les moins profonds initiés par saturation de la tranche supérieure du massif superficiel (Terlien, 1998, Iverson, 2000).